
Schriftenreihe
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik
Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
Technische Universität Clausthal

Herausgegeben von Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux

**Numerische Analyse des Tragverhaltens komplexer
gebirgsmechanischer untertägiger Systeme mit filigranen
Strukturen bei Anwesenheit von Imponderabilien**

Ein Beitrag zur Systematisierung des Untersuchungsprozesses mit
Anwendung/Demonstration am Beispiel des Salzbergwerks
Schacht ASSE II/Südflanke

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

von
Dipl.-Ing. Oleksandr Dyogtyev

genehmigt von der
Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

**Numerische Analyse des Tragverhaltens komplexer gebirgsmechanischer
untertägiger Systeme mit filigranen Strukturen bei Anwesenheit von
Imponderabilien**

**Ein Beitrag zur Systematisierung des Untersuchungsprozesses mit
Anwendung/Demonstration am Beispiel des Salzbergwerks Schacht
ASSE II/Südflanke**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Oleksandr Dyogtyev
aus Charkow, Ukraine

genehmigt von der
Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

02. März 2017

Vorsitzender der Promotionskommission:	Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Goldmann
Hauptberichterstatte:	Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux
Mitberichterstatte:	Prof. Dr.-Ing. S. Heusermann

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal.

Als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik war ich mit der Durchführung des BMUB-Vorhabens „*Projektgruppe Asse: Beratungsleistungen für BMUB bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Schachanlage Asse II, Teilbereich Gebirgsmechanische Untersuchungen*“ (Kennziffer BMUB: UM13A03505) betraut. Die Ergebnisse des genannten Forschungsvorhabens bilden die Basis für diese weiterführende Arbeit. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bedanken bei Frau Dr. Sefzig (BMUB) für das stetige Interesse am Fortgang der Arbeiten und bei Herrn Dr. Eilers (BMUB) für die fachkundige und kritische sowie in hohem Maße motivierende Begleitung der Arbeiten.

Für die langjährige wissenschaftliche Betreuung und die stetigen fachlichen Anregungen, Diskussionen und Ratschläge bedanke ich mich bei meinem Hauptreferenten Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Lux. Fernes bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Heusermann für die freundliche Übernahme des Koreferats.

Mein besonderer Dank gilt Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Düsterloh für die freundschaftliche Zusammenarbeit und die ständige Diskussionsbereitschaft.

Großen Dank schulde ich Frau Dr.-Ing. Svetlana Lerche für die zahlreichen Fachgespräche. Ihre fachlichen Hinweise zur Lösung anstehender Fragen waren mir eine wertvolle Hilfe bei der Anfertigung der vorliegenden Arbeit.

Für die tatkräftige Hilfe bei der umfangreichen technischen Vorbereitung der numerischen Untersuchungen im Rahmen seiner mehrjährigen erfolgreichen Tätigkeit als studentische Hilfskraft bedanke ich mich bei Herrn M. Sc. Tianjie Pan und wünsche ihm viel Erfolg bei seiner aktuellen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Besonderer Dank gilt auch Frau B. Ehrenberg für ihre langjährige freundschaftliche Unterstützung sowie ihre Mithilfe bei der redaktionellen Durchsicht der Arbeit.

Auch allen weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik möchte ich für ihre Unterstützung und Aufheiterung während vieler, zum Teil anstrengender Stunden danken.

Außerdem danke ich meinen Eltern, die durch ihre ständige Unterstützung maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Clausthal-Zellerfeld, im Oktober 2016

Oleksandr Dyogtyev

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	5
2	Stand der Wissenschaft im Bereich gebirgsmechanischer numerischer Untersuchungen von untertägigen Tragwerken mit filigranen Strukturen bei Anwesenheit von Imponderabilien	8
2.1	Typische Aufgabenstellungen und Besonderheiten/Herausforderungen	8
2.2	Typische Vorgehensweisen und Empfehlungen	13
2.3	Untersuchungsbedarf und ein strategischer Vorschlag für den Umgang mit den Herausforderungen	17
3	Konzept zur optimierten Durchführung numerischer Untersuchungen zum Tragverhalten von großräumigen untertägigen Systemen mit filigranen Strukturen bei Anwesenheit von Imponderabilien	19
3.1	Konzeptueller Ansatz für die Klassifizierung diskretisierter Modelle nach der Modellkomplexität zur präzisierten Charakterisierung des Untersuchungsobjektes	19
3.2	Gesamtstruktur und Hauptkomponenten des Optimierungs-Konzeptes	29
3.2.1	Schematische Darstellung des Konzeptes	29
3.2.2	Voranalyse und Formulierung der Anforderungen	30
3.2.3	Etappe I – Aufbau eines grundsätzlichen Verständnisses zum Systemverhalten	31
3.2.4	Etappe II – Aufbau und Validierung eines komplexen numerischen Instrumentariums für das Globalsystem	32
3.2.5	Etappe III – Anwendung des Globalmodells auf die vorgegebenen Fragestellungen	33
3.2.6	Etappe IV – Realisierung des eingebauten Modifikationspotentials	34
4	Anwendungsbeispiel Schachtanlage Asse II: Untersuchungsobjekt und Untersuchungsziele	35
4.1	Untersuchungsobjekt	35
4.1.1	Gebirgsbau im Bereich der Schachtanlage Asse II	35
4.1.2	Untertägige Struktur der Schachtanlage Asse II	37

4.1.3	Geschichtliche Entwicklung des Grubengebäudes	40
4.2	Untersuchungsziele	43
5	Ansätze zur physikalischen Modellierung	44
5.1	Homogenbereich Steinsalzgebirge	44
5.2	Homogenbereich Carnallititgebirge	47
5.3	Homogenbereich Deck- und Nebengebirge	48
5.4	Homogenbereich Störungszonengebirge	50
5.5	Homogenbereich Versatz	51
6	Anwendung des entwickelten Konzeptes am Beispiel der Schachtanlage Asse II/Südflanke – Voranalyse und Etappe I	52
6.1	Voranalyse des realen Systems und Formulierung der Anforderungen an das idealisierte System	52
6.1.1	Analyse der geometrischen Daten (3D-Zeichnung)	52
6.1.2	Übersicht der zur Verfügung stehenden In-situ-Messwerte	61
6.1.3	Analyse der Ungewissheiten/Imponderabilien	63
6.1.4	Feststellung des Schwierigkeitsgrades und damit der Komplexität des zu erstellenden numerischen Modells	64
6.2	Etappe I: Aufbau eines grundlegenden Verständnisses zum Systemverhalten	67
6.2.1	Beherrschung einzelner Prozesse	67
6.2.1.1	Abbildung des Entfestigungsprozesses im Tragsystem	67
6.2.1.2	Abbildung der großräumigen Gebirgsbewegungen im Gesamtsystem	70
6.2.2	Realitätsnahe Abbildung des Systemtragverhaltens mit den Hauptmechanismen	73
6.2.2.1	Q-3D-Modell als repräsentativer idealisierter Ausschnitt für das Gesamtsystem	73
6.2.2.2	Validierung des Q-3D-Modells / Erstellung von Haupthypothesen zum Systemtragverhalten	75
6.2.3	Abschließende Vorbereitungen auf die Etappe II	81

6.2.3.1	Optimierung in der Abbildung der Entfestigungsprozesse im Tragsystem	81
6.2.3.2	Abschätzung der optimalen Modellgröße für die Abbildung des Gesamtsystems	85
6.3	Zusammenfassende Bewertung der bislang erzielten Ergebnisse	87
7	Anwendung des entwickelten Konzeptes am Beispiel der Schachtanlage Asse II/Südflanke – Etappe II: Aufbau eines numerischen Instrumentariums für das Gesamtsystem	88
7.1	Aufbau des 3D-Basismodells für das Gesamtsystem	88
7.1.1	Idealisierung der geotektonischen Situation und der Grubengebäude-Geometrie	88
7.1.2	Definition der Teilmodelle	91
7.1.3	Einbau einer Variationsmöglichkeit in Bezug auf die Positionierung der Störungszonen	92
7.1.4	Diskretisierung der Teilmodelle und der Übergangsbereiche	94
7.1.5	3D-Basismodell und erste 3D-Modellreihe	99
7.2	Erste Validierung des 3D-Basismodells durch den Vergleich mit als für das Tragverhalten charakteristisch angesehenen In-situ-Messwerten / Pfeilerstauchungsraten	102
7.2.1	Vorüberlegungen	102
7.2.2	Tragverhalten und erster Vergleich	104
7.3	Vertiefung der Validierung durch Vergleich der numerischen Ergebnisse anhand des 3D-Gesamtmodells mit weiteren In-situ-Messwerten	106
7.3.1	Vergleich mit den Pfeilerstauchungsmessungen (horizontale Verschiebungen)	106
7.3.2	Vergleich mit den Inklinometermessungen (vertikale Verschiebungen)	109
7.3.3	Vergleich mit den Verschiebungen von markscheiderischen Festpunkten	111
7.3.4	Vergleich mit den Oberflächenabsenkungs-Messungen	115
7.3.5	Vergleich mit den Volumenänderungs-Messungen in den Einlagerungskammern	119
7.3.6	Vergleich mit den Spannungsmessungen	120
7.3.7	Vergleich mit den Versatzdruckmessungen	128

7.4	Zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Validierung erzielten Ergebnisse	131
8	Anwendung des entwickelten Konzeptes am Beispiel der Schachtanlage Asse II/Südflanke – Etappe III: Anwendung des Globalmodells auf die vorgegebenen Fragestellungen	133
9	Anwendung des entwickelten Konzeptes am Beispiel der Schachtanlage Asse II/Südflanke – Etappe IV: Realisierung des eingebauten Modifikationspotenzials	135
9.1	Modifikation des 3D-Gesamtmodells durch die Neudiskretisierung eines der schon zur Verfügung stehenden Teilmodelle	135
9.2	Implementierung eines Lokalmodells in die filigrane Struktur des existierenden 3D-Gesamtmodells durch die Definition neuer Teilmodelle	136
9.3	Zusammenfassende Bewertung der erzielten Ergebnisse	140
10	Zusammenfassung und Ausblick	146
11	Literaturverzeichnis	149

1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Fokus der in dieser Arbeit vorzunehmenden gebirgsmechanischen Untersuchungen liegen komplexe geometrische untertägige anthropogene Strukturen, die eingebettet sind in großräumige geogene Systeme. Als typische aktuell bleibende bzw. an Aktualität gewinnende relevante Anwendungsbereiche sind vor allem der Kavernenbau, der Mineralgewinnungs-Bergbau sowie die Planungen zum Bau von Endlagern zur Entsorgung radioaktiver Abfälle zu nennen (*ENTRIA (2012)*).

Im Rahmen der vorstehend genannten Anwendungsbereiche der Gebirgsmechanik besteht die grundlegende Zielsetzung in der Gegenüberstellung der vorhandenen und der ertragbaren Beanspruchungen in Raum und Zeit, *Düsterloh, U. (2011)*. Zu unterscheiden sind dabei Standorte mit schon bestehenden untertägigen Strukturen, die weitergenutzt, umgewidmet oder auch stillgelegt werden sollen und Standorte, die erstmalig geplant werden. Während in dem ersten Fall auf einen schon vorhandenen Datenpool zum Tragverhalten zurückgegriffen werden kann, liegen im zweiten Fall nur grundsätzliche Kenntnisse zum Tragverhalten ähnlicher Tragsysteme an anderen Standorten mit ähnlichen geologischen Verhältnissen vor. Dabei ist die Re-Analyse des Systemverhaltens in der Vergangenheit zur Validierung des numerischen Modells vor dem Einsetzen dieses numerischen Instrumentariums sowohl für die Analyse des aktuellen Zustandes des zu untersuchenden realen Systems als auch für die prognostische Analyse des weiteren, unter veränderten Einwirkungen oder nach konfigurativen Eingriffen zu erwartenden Systemverhaltens notwendig, *Lux, K.-H. (1984)*. Darüber hinaus sind historische Analysen von Tragwerkssituationen notwendig, um für den zweiten Fall grundsätzliche Kenntnisse hinsichtlich Prozess- und Systemverständnis zu Eingriffen in das jeweilige geologische Milieu zu erarbeiten.

Aus der ausgesprochenen Komplexität der Untersuchungsobjekte in diesen Anwendungsbereichen resultiert ein besonderer Zweig umfangreicher anspruchsvoller Aufgabenstellungen, in dem ein gesamtes System bestehend aus anthropogener filigraner Struktur eingebettet in eine großräumige geogene Struktur in die gebirgsmechanische Analyse einbezogen werden muss. Typisch dabei ist die Vielfalt der Fragestellungen, die sich sowohl auf das Verhalten des Gesamtsystems, als auch auf das Verhalten zonaler bzw. sogar lokaler Bereiche des betrachteten Systems beziehen können.

Nachfolgend werden die im Fokus dieser Arbeit stehenden Aufgabenstellungen durch spezifische Merkmale separiert/definiert.

1) *Ausgeprägte Komplexität der Aufgabenstellung bedingt durch die Notwendigkeit der Einbeziehung des Gesamtsystems in die numerischen Untersuchungen*

Bedingt durch die Komplexität des zu untersuchenden Systems – geogene Strukturen (global) und anthropogene Strukturen (filigran) mit ausgeprägter Wechselwirkung – würde die Begrenzung auf eine idealisierte Abbildung von nur Teilsystemen eine zu starke Vereinfachung bedeuten und wird somit als nicht zielführend bewertet.

2) *Ausgeprägte Komplexität der Aufgabenstellung bedingt durch die Existenz von Imponderabilien im System*

Bedingt durch die Unvollständigkeit der Informationen über das reale abzubildende System ist eine aufwendige Feststellung des Systemverhaltens/Untersuchungen zum Systemverhalten im Sinne der das System-Verhalten bestimmenden Prozesse und deren Wechselwirkungen notwendig.

3) *Aktualität und Relevanz derartiger komplexer Aufgabenstellungen*

- Die Bearbeitung von Aufgabenstellungen mit derartiger Komplexität stellt von sich aus ein relativ neues Untersuchungsgebiet dar. Aktuell sind noch wenige Beispiele vorhanden/bekannt, da diese bisher mit den vorhandenen technischen Möglichkeiten mit einem akzeptablen Zeitaufwand kaum realisierbar waren.
- Andererseits befindet sich dieses Untersuchungsgebiet in Entwicklung mit offenbar guten Entwicklungsperspektiven. Mit der stetigen Weiterentwicklung von Rechenkapazitäten sowie Rechenleistung werden aufwendige realitätsnahe Untersuchungen für derartige komplexe Systeme in akzeptablen Zeiträumen immer möglicher/realisierbarer und gefragter.

Diese besonderen Aufgabenstellungen erfordern von vornherein eine spezifische Vorgehensweise, die vielleicht auch zu einer Methodik generalisiert werden kann. Bisher sind jedoch eher allgemeingültige, nicht spezifizierte Empfehlungen zur Durchführung numerischer Untersuchungen im Bereich der Geomechanik vorhanden, *Barbour, S. L., Krahn, J. (2004), Hohberg, J.-M. (2011), DGGT (2014), European Commission COST C7 (2002), ASME (2006)*.

Somit ist der Bedarf für die Entwicklung einer möglichst spezifizierten systematischen Vorgehensweise in Bezug auf die vorstehend skizzierten Aufgabenstellungen erkannt. Bei einer nicht schon von vornherein sorgfältig geplanten und entsprechend systematisierten Durchführung derartiger Untersuchungen ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass

- die Fragestellungen nur unzureichend realitätsnah bearbeitet werden können;

- der Bearbeitungs- und Rechenzeitaufwand für die numerischen Untersuchungen mit dem angestrebten Annäherungsgrad an die Realität den bestehenden Rahmen sprengt und die Balance zwischen den vorhandenen Möglichkeiten (technisch, zeitaufwandbezogen) und dem notwendigen Annäherungsgrad an die Realität nicht gefunden wird;
- eine weitere Erhöhung des Annäherungsgrades prinzipiell limitiert wird oder nicht möglich ist durch mangelhafte Flexibilität des aufgebauten Instrumentariums;
- Modifikationen in insbesondere konfigurativen Parametern eine erneute vollständige numerische Bearbeitung des Simulationsmodells erfordern.

Aus dem erkannten Weiterentwicklungsbedarf werden folgende zwei grundlegende *Aufgabenstellungen und Zielsetzungen für die Arbeit* formuliert:

- 1) Entwicklung eines Konzeptes zur Systematisierung der Vorgehensweise zur Bearbeitung komplexer geomechanischer Systeme mit Anwesenheit von Imponderabilien.

Das entwickelte Konzept soll führen

- zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Bearbeitung der vorgegebenen Aufgabenstellungen auf dem angestrebten Niveau der Realitätsnähe und mit möglichst geringen Verlusten an Realitätsnähe durch abstraktionsbedingte Zwänge (Abbildung des gesamten komplexen Systems);
- zur Optimierung des Zeitaufwandes für die Realisierung numerischer Untersuchungen an komplexen konfigurativen geotechnischen Tragsystemen unter Einbezug auch einer umfassenden Validierung des aufgebauten numerischen Instrumentariums anhand von Variationsanalysen (bedingt durch Imponderabilien);
- zum Aufbau eines ausgeprägt flexiblen numerischen Instrumentariums, das besonders geeignet und optimiert ist zur Weiterentwicklung im Hinblick auf die Bearbeitung neuer Fragestellungen bzw. zur Aktualisierung des schon vorhandenen Instrumentariums zur Berücksichtigung eines neuen Kenntnisstandes.

- 2) Anwendung des entwickelten Konzeptes an einem charakteristischen Beispiel mit einem hinreichend komplexen Untersuchungsobjekt zur Demonstration einer zielführend realitätsnahen Abbildung des Systemverhaltens im Rahmen der numerischen Untersuchungen. Als Beispiel wird hier das Salzbergwerk Schacht Asse II/Südflanke zur Durchführung der Tragwerksanalyse mit Validation ausgewählt.

2 Stand der Wissenschaft im Bereich gebirgsmechanischer numerischer Untersuchungen von untertägigen Tragwerken mit filigranen Strukturen bei Anwesenheit von Imponderabilien

2.1 Typische Aufgabenstellungen und Besonderheiten/Herausforderungen

Innerhalb des gesamten Gebietes gebirgsmechanischer Untersuchungen kann ein besonderer Bereich komplexer anspruchsvoller Aufgabenstellungen separiert werden, in dem ein großräumiges untertägiges System in die gebirgsmechanische Analyse einbezogen werden muss, das im Zentrum aus einer anthropogenen filigranen konfigurativen Struktur besteht, die eingebettet ist in eine großräumige geogene Struktur. Zu der Besonderheit der Untersuchungsobjekte in diesem Anwendungsbereich gehört vor allem eine ausgeprägte Komplexität des Gebirgsaufbaus sowie meist auch der anthropogenen Strukturen, die in derart intensiver Wechselwirkung stehen, dass eine getrennte oder partielle Betrachtung von extrahierten Teilsystemen von vornherein als eher unzulänglich erscheint.

Eine zusätzliche Herausforderung bei der Modellierung von derartigen Tragsystemen stellen geo- oder tragsystemimmanente Imponderabilien dar: Informationen über die Geometrie des Gebirgsbaus, über das geotektonische Inventar, über die Materialeigenschaften von Homogenbereichen sowie über die lokalen Gegebenheiten/Bedingungen wie etwa den Entfestigungsstand und die Anwesenheit von Feuchte sind eher nicht vollständig vorhanden. Die Anwesenheit dieser Imponderabilien im System erfordert im Hinblick auf eine hinreichend zuverlässige Prognose zunächst eine umfangreiche Validierung von numerischen Modellen anhand von In-situ-Messdaten. Dabei existiert ein prinzipieller Zusammenhang: je größer die Anzahl von Ungewissheiten ist, umso größer ist auch der Validierungsaufwand und damit die Anzahl von einzelnen Simulationsläufen mit Variationen zur Prozess- und Systemanalyse.

Bekannter weise kommt zu den geotektonischen und konfigurativen Spezifika ein im Vergleich zu Materialien wie Beton und Stahl sehr komplexes Materialverhalten der natürlichen Gesteine im Gebirgsverband und vor allem der Salinargesteine erschwerend dazu, *Lux, K.-H. (1984), Barbour S.L., Krahn J. (2004)*, deren physikalische Modellierung einen der wesentlichen Bestandteile der numerischen Simulationen darstellt.

Prinzipiell ist eine Re-Analyse des Systemverhaltens in seiner bisherigen Vergangenheit zur Validierung des numerischen Modells vor dem Einsetzen dieses numerischen Instrumentariums notwendig - sowohl für die Analyse des aktuellen Zustandes des zu untersuchenden realen Systems als auch für die prognostische Analyse.

Im Fokus dieser Arbeit stehen vor diesem Hintergrund gebirgsmechanische Untersuchungen von globalen komplexen untertägigen Tragsystemen mit filigranen Teil-Strukturen, für die eine gleichzeitige Modellierung von großräumigen Bereichen zur Berücksichtigung der geologischen Situation in der Umgebung des zu untersuchenden Tragwerkes und filigranen Strukturen wie z. B. einem Grubengebäude notwendig ist. Diese Rahmenbedingungen erfordern eine gleichzeitige Modellierung von Systemelementen in unterschiedlichen konfigurativen Skalen und führen zum Aufbau komplexer Modelle mit einer ausgeprägt großen Anzahl von diskreten Elementen zur angemessenen Diskretisierung der jeweiligen in einem Verbundtragsystem gekoppelten Teilstrukturen (Gebirgsbau mit relevantem geotektonischen Inventar und technogenen Konfigurationen mit Tragwerkskomponenten) (finite Elemente bei der Finite-Elemente-Methode oder finite Zonen bei der Finite-Differenzen-Methode).

Die im Rahmen dieser Arbeit behandelte Gruppe von numerischen Modellen soll anhand folgender Charakteristika abgegrenzt werden:

- Einbeziehung von vergleichsweise großräumigen Gebirgsbereichen mit einem komplexen geotektonischen Aufbau in die Modellierung;
- Einbeziehung von komplexen filigranen anthropogenen untertägigen Teil-Strukturen in die Modellierung;
- Notwendigkeit einer Berücksichtigung mehrerer nur integral erfassbarer Wirkungsfaktoren, die das Systemverhalten prägen und zum Teil durch eine starke Behaftung mit Imponderabilien geprägt sind;
- Notwendigkeit einer simultanen Berücksichtigung gegenseitiger Wechselwirkungen zwischen den großräumigen Gebirgsbereichen und den filigranen Teil-Strukturen.

Hier wird das an letzter Stelle stehende Kriterium als das Hauptmerkmal angesehen. Dieses Kriterium begrenzt drastisch die Möglichkeiten der Vereinfachung der Modellierung durch die Nutzung von Symmetrieannahmen zur Reduzierung der räumlichen Ausdehnung des zu modellierenden Gebirgsausschnittes.

Im Rahmen der numerischen Modellierung bedingt dieser Sachverhalt damit die Notwendigkeit einer aufwendigen Erstellung ausgesprochen komplexer Berechnungsmodelle. Allerdings ist dann nicht nur die Erstellung, sondern auch die Durchführung numerischer Simulationen mit diesen Berechnungsmodellen zwangsläufig sehr anspruchsvoll.

Heutzutage ist der Einsatz derartig komplexer numerischer Modelle im Bereich der Geotechnik noch sehr gering. Dieser Sachverhalt ist durch folgende Besonderheiten bei der Modellerstellung zu begründen:

- mitunter die Notwendigkeit einer aufwendigen Bearbeitung einer großen Datenbasis (konfigurative In-situ-Messdaten);
- bislang eine vergleichsweise selten auftretende Möglichkeit der Realisierung, bedingt durch die Notwendigkeit einer langjährigen Realisierungsdauer;
- äußerst zeit- und kapazitätsaufwendige Modellerstellung und Simulationsdurchführung, die erst heutzutage, durch die stetige Erhöhung der Rechnerkapazitäten realisierbar sind sowie durch eine ansteigende Nachfrage tatsächlich auch realisiert werden.

Nachstehend werden einige aus der Literatur bekannte Beispiele zu einer aufwendigen Modellierung eines gesamten zu untersuchenden komplexen geomechanischen Systems kurz demonstriert.

In *Bild 2.1* ist ein großräumiges 3D-FEM-Modell dargestellt, das für die Analyse der Wechselwirkungen bei der Erweiterung des existierenden Kavernenfeldes in dem Bayou Choctaw Salzdiapir um drei neue Kavernen in Bezug auf die Konvergenz und das Tragverhalten verwendet wurde, s. *Park, B.Y., Ehgartner, B.L. (2012)* und *Sobolik, S.R., Lord, A.S. (2015)*. Darüber hinaus wird in neuerer Zeit insbesondere die Wechselwirkung zwischen Kavernenkonvergenz und zusätzlicher Bohrlochausbaubeanspruchung untersucht.

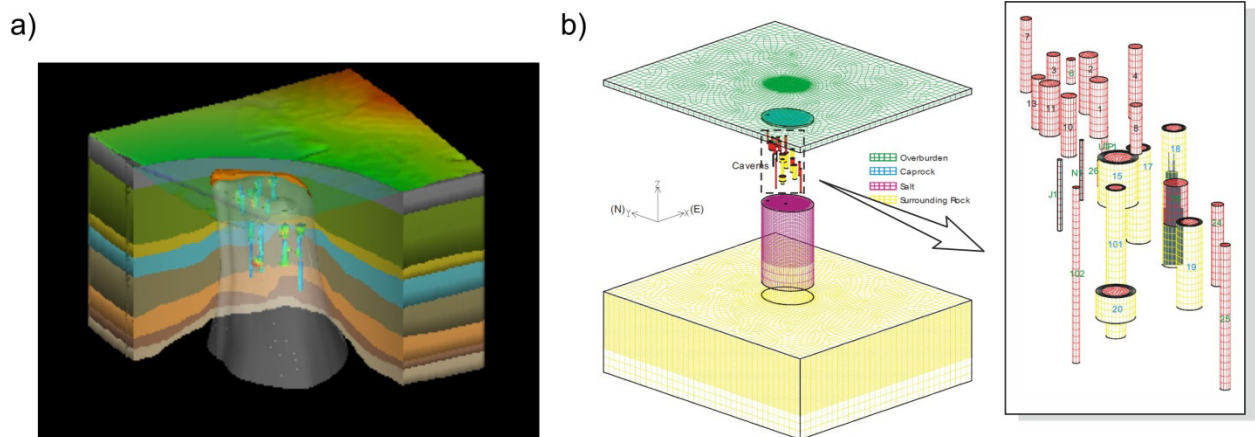
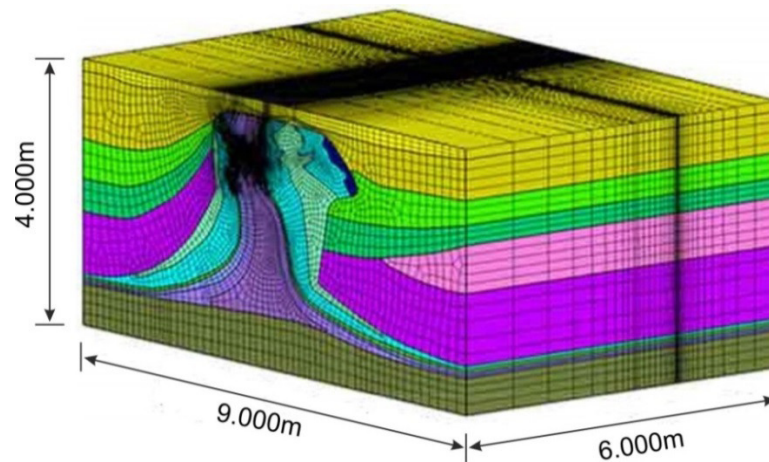


Bild 2.1: Kavernenfeld in dem Bayou Choctaw Salzdiapir a) 3D-Zeichnung der geologischen Situation, Rautman, C. (2014) b) großräumiges 3D-Berechnungsmodell, nach SANDIA (2006)

In *Bild 2.2* ist ein für thermo-mechanisch gekoppelte prognostische Analysen verwendetes großräumiges 3D-Modell für den untertägigen Gebirgsaufbau sowie die anthropogenen Strukturen im Erkundungsstandort Gorleben zu sehen. Detaillierte Beschreibungen zur Geologie und zum Modellaufbau sind *Heusermann, S., Vogel, P., Eickemeier, R., Nipp, H.-K. (2012)* bzw. *Heusermann, S., Eickemeier, R., Fahland, S. (2015)* zu entnehmen.

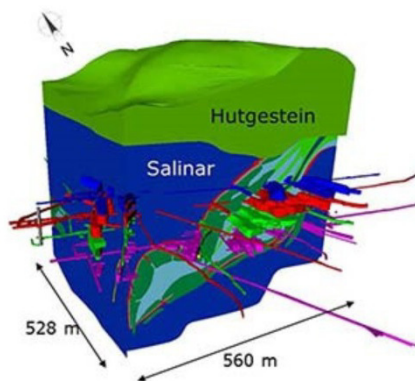


Quelle: BGR

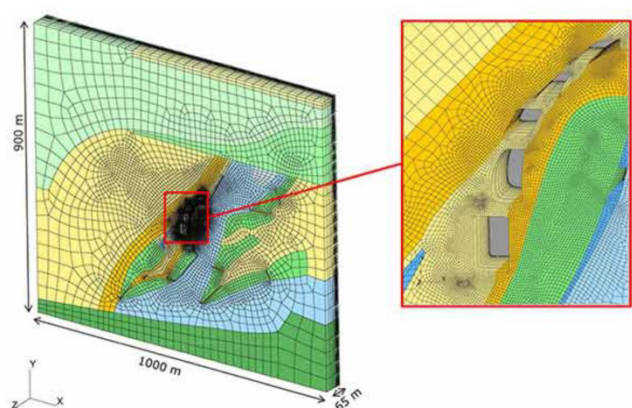
Bild 2.2: Großräumiges Modell für den untertägigen Gebirgsaufbau im Erkundungsstandort Gorleben (Heusermann et al., 2012, 2015)

In *Bild 2.3* ist ein großräumiges 3D-Modell für das Südfeld des Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (ERA) Morsleben zu sehen, *BGR (2015)*. *Bild 2.3a* zeigt einen Ausschnitt aus der 3D-Zeichnung für die komplexe geologische Situation und für das Grubengebäude des ehemaligen Kali- und Steinsalzbergwerks Bartensleben. In *Bild 2.3b* ist ein 3D-Finite-Elemente-Modell mit den idealisierten Verläufen der geologischen Homogenbereiche und mit den Abbaukammern im Südfeld dargestellt, welches für die Untersuchungen der Langzeitintegrität der Salzbarriere verwendet wurde. Der aktuelle Stand der geomechanischen Modellierungen im Rahmen der Untersuchungen zur Stabilität der Grubenbaue und zur Integrität der Salzbarriere im ERA Morsleben ist bei *Fahland, S., Heusermann, S., Schäfers, A. (2015)* zu finden.

a)



b)



Quelle: BGR (2015)

Bild 2.3: Endlager Morsleben für schwach- und mittelradioaktive Abfälle a) 3D-Zeichnung der geologischen Situation und der Grubenbaue, b) 3D-Finite-Elemente-Modell des Südfeldes (BGR, 2015)

Bild 2.4 zeigt ein großräumiges dreidimensionales gebirgsmechanisches Modell des *IfG Leipzig* mit der komplexen geologischen Situation und mit der gesamten westlichen Hälfte des Grubengebäudes des Bergwerkes Asse II. Dieses großräumige 3D-Modell wurde für die gebirgsmechanische Tragfähigkeits- und Zustandsanalyse sowie auch für die Untersuchungen lokaler gebirgsmechanischer Aufgabenstellungen verwendet. Eine aktuelle kurze Zusammenfassung zu den mehrjährigen Arbeiten mit der Entwicklung von großräumigen 2D- und 3D-Simulationsmodellen im Hinblick auf numerische Untersuchungen zur Ermittlung des Tragverhaltens des Bergwerkes Asse II ist bei *Kamlot, P., Günther, R.-M., Gärtner, G., Teichmann, L. (2015)* bzw. bei *Günther, R.-M., Kamlot, P., Weise, D., Gärtner, G. (2015)* zu finden.

Das Bergwerk Asse II wird auch in dieser Arbeit als ein Demonstrationsbeispiel für numerische Untersuchungen an großräumigen Systemen mit filigranen Strukturen herangezogen (s. Kapitel 4).

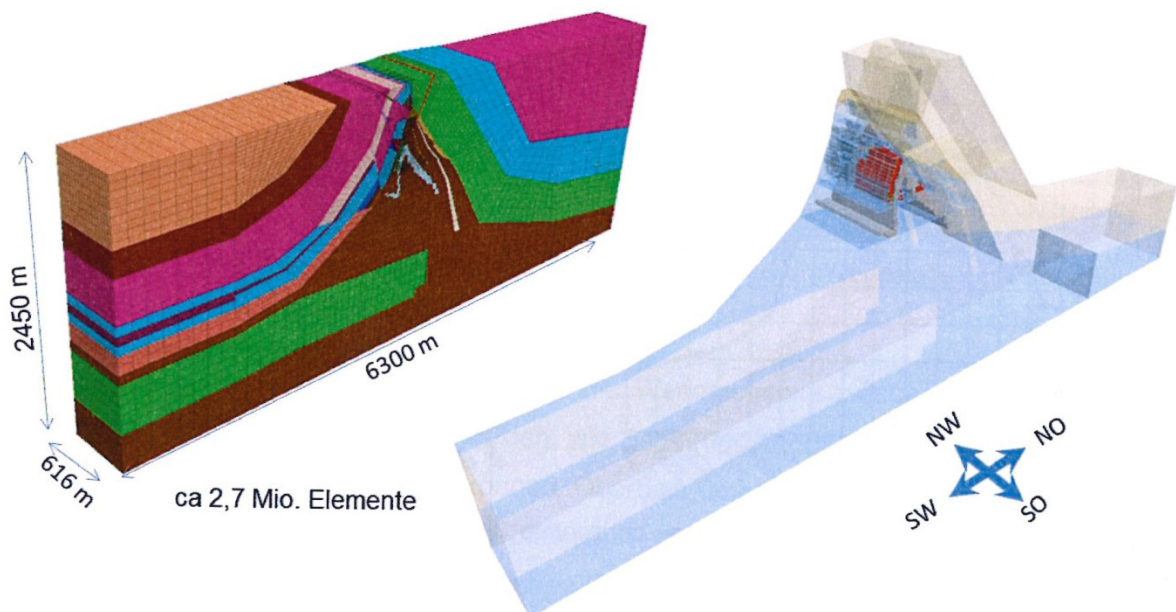


Bild 2.4: Großräumiges dreidimensionales gebirgsmechanisches Modell des IfG Leipzig für die westliche Hälfte des Grubengebäudes des Bergwerkes Asse II, Günther, R.-M., Kamlot, P., Weise, D., Gärtner, G. (2015)

2.2 Typische Vorgehensweisen und Empfehlungen

Die Realisierung von gebirgsmechanischen Untersuchungen beruht grundsätzlich auf laborativen Experimenten zur physikalischen Modellierung und auf In-situ-Untersuchungen zum Gebirgsbau, auf Beobachtungen und Messungen sowie auf zunehmend komplexer werdenden numerischen Simulationen.

In der geotechnischen ingenieur-wissenschaftlichen Praxis ist in Fachkreisen seit 1987 die Zuordnung numerischer Untersuchungen von *Burland (1987)* entsprechend dem „Burland-Dreieck“ (s. *Bild 2.5*) verbreitet und bis heute nach wie vor aktuell, *Barbour, S. L., Krahn, J. (2004), Hohberg, J.-M. (2011), DGGT (2014)*.

Diese Darstellung in Form des „Burland-Dreieck“ demonstriert die übliche Vorgehensweise bei der Bearbeitung komplexer geotechnischer Aufgaben. Es wird ein systematischer Verständnis- und Kenntnisaufbau angestrebt über den geotektonischen Aufbau sowie über das Materialverhalten einzelner geologischer Schichten mithilfe von Labor- und Felduntersuchungen, Beobachtungen und Messungen. Diese Kenntnisse vereint mit der physikalischen Modellierung und dem Fachwissen und mit der Erfahrung des Ingenieurs spiegeln sich wider in dem Aufbau numerischer Modelle, die ihrerseits als ein mächtiges Instrumentarium zur idealisierten Abbildung, Simulation und Analyse der zu untersuchenden Systeme Anwendung finden.

Zu betonen ist dabei, wie schon in *Barbour S.L., Krahn J. (2004)* erwähnt, dass Modellbildung und Modellanalyse eine gleichwertige Komponente neben Baugrundaufschluss und Baugrundverhalten darstellen, gleichzeitig jedoch eine integrative Funktion dadurch ausüben, dass sie die Kenntnisse aus den anderen Komponenten akkumulieren. Diese wesentliche Komponente der ingenieur-wissenschaftlichen Untersuchungspraxis steht im Fokus dieser Arbeit.

Eine ausführliche grundsätzliche Aufstellung von Empfehlungen bzw. Richtlinien im Hinblick auf die Durchführung von numerischen Analysen im Rahmen der Bearbeitung geotechnischer Aufgaben ist beispielsweise in *DGGT (2014)* und in *European Commission COST C7 (2002)* bzw. noch grundsätzlicher gefasst für die numerische Simulationen im Bereich der Festkörpermechanik in *ASME (2006)* zu finden.

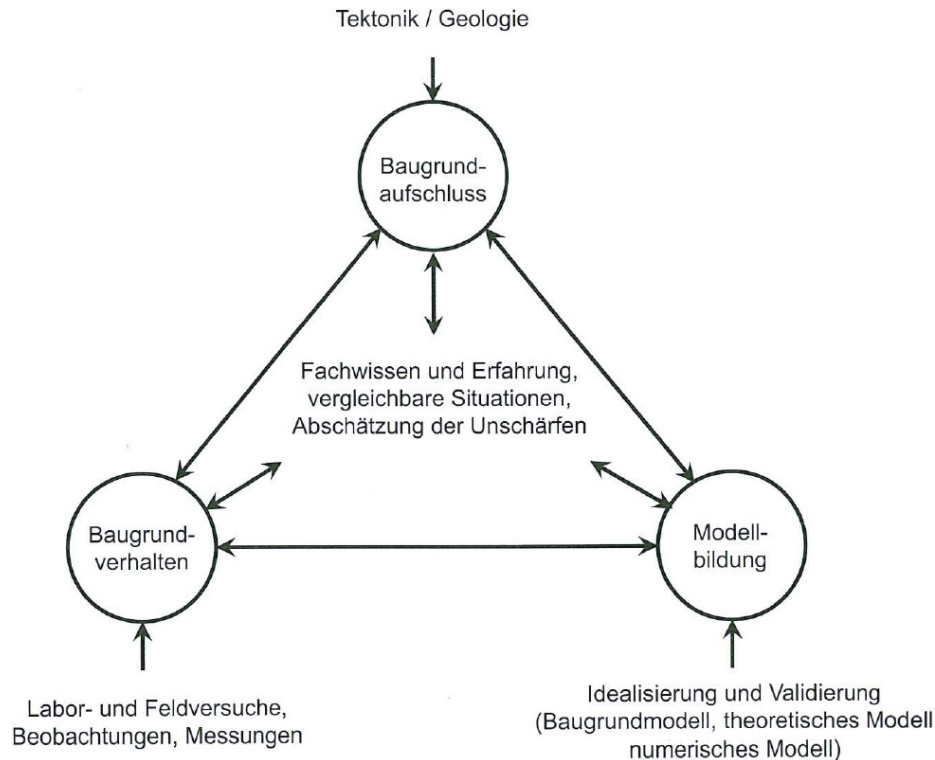


Bild 2.5: „Burland-Dreieck“ nach DGGT (2014)

Die in ASME (2006) vorgeschlagenen Richtlinien beschreiben ein generalisiertes Konzept für die Entwicklung eines numerischen Modells und auch für seine Verifikation und die Validierung in den numerischen Analysen im Bereich der Festkörpermechanik. Diese Richtlinien beruhen auf einer vorausgehenden Formulierung von Hauptprinzipien. Davon ausgehend wird dann die Strukturierung für die Richtlinien geschaffen. Im Rahmen der vorgeschlagenen Struktur wird in ASME (2006) die Entwicklung des numerischen Modells als eines der Hauptthemen bearbeitet. In Bezug auf die Vorgehensweise zur Entwicklung des numerischen Modells wird dabei eine logische Kette aufgebaut – angefangen vom konzeptuellen Modell bis zum eigentlichen numerischen Modell, Bild 2.6.

Weiterhin wird für den Verifikations- und Validierungsprozess eines komplexen Systems eine hierarchisch strukturierte Bearbeitungsreihenfolge vom Komponentenniveau bis zum Systemniveau vorgeschlagen. Interessant ist hier das als Stützpunkt zur Erstellung eines Verifikations- und Validierungsplans vorgeschlagene konzeptuelle Schema mit einzelnen Bearbeitungsetappen, mit ihren strukturellen Verbindungen und mit den jeweils zu erwartenden Ergebnissen, Bild 2.7.

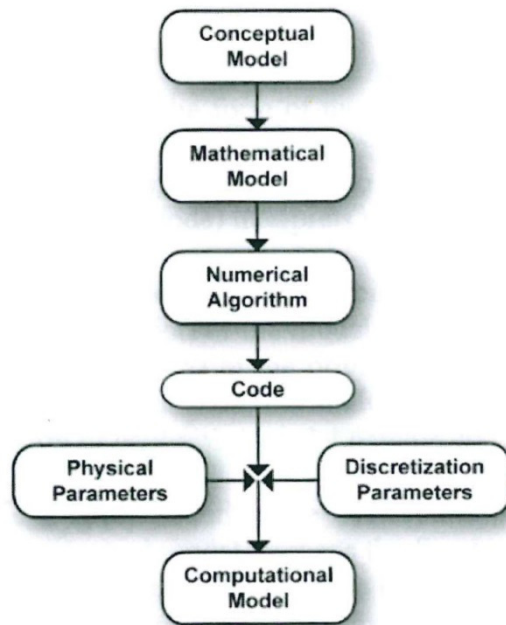


Bild 2.6: Etappen in der Entwicklung des numerischen Modells, ASME (2006)

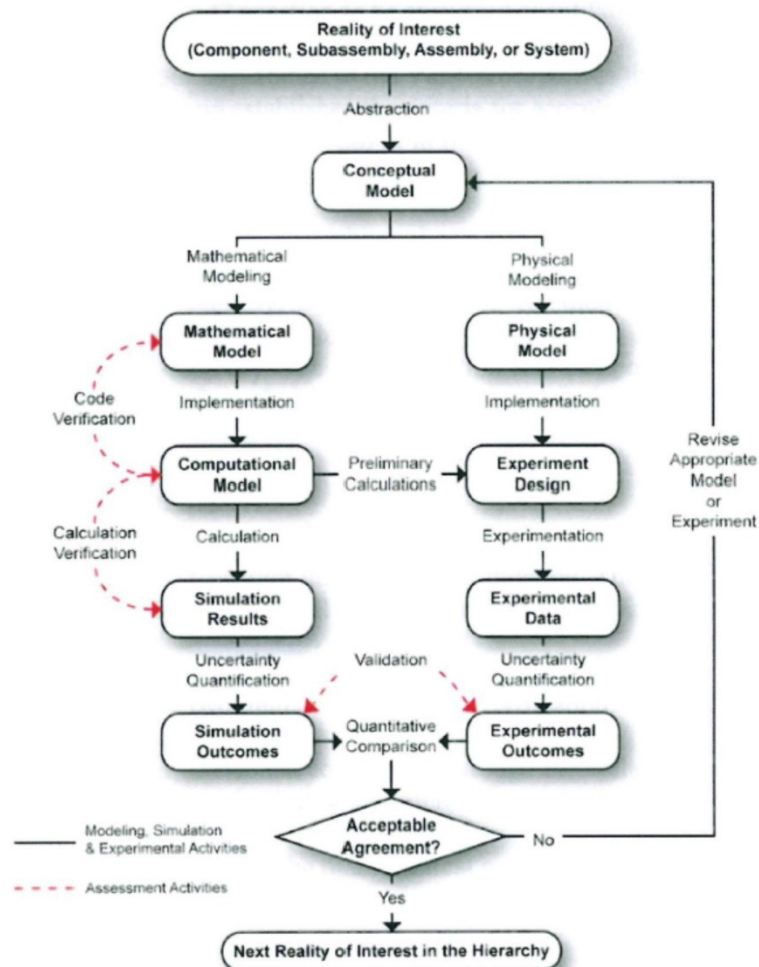


Bild 2.7: Bearbeitungsetappen und Hauptergebnisse des Verifikations- und Validierungsprozesses, ASME (2006)

In *European Commission COST C7 (2002)* wird ausführlich über die Komplexität derzeitiger numerischer Analysen mit der Notwendigkeit der Einbeziehung von Fachwissen vor allem aus den Bereichen der Strukturanalyse, der physikalischen Modellierung sowie der Theorie der numerischen Verfahren diskutiert. Außerdem wird hier eine Struktur für die minimal erforderliche Dokumentation der Eingangsdaten und anschließend der Ergebnisse numerischer Simulationen vorgeschlagen.

Diesbezüglich sind des Weiteren die vom Arbeitskreis AK 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der DGGT erarbeiteten Empfehlungen zum Qualitätsmanagement und zur Dokumentation numerischer Berechnungen erwähnenswert, *DGGT (2014)*. Hier wird unter anderem der Analyseplan im Rahmen einer Projektbearbeitung basierend auf dem „V-Modell“ entsprechend *Bild 2.8* systematisiert/strukturiert, *Hohberg, J.-M. (2011)*. Dieses „V-Modell“ gibt Empfehlungen für den gesamten Prozess der Analyse von komplexen Aufgaben in Form eines schrittweisen Vorgehens angefangen von der Formulierung der Projektanforderungen bis hin zu der Dokumentation und der Abnahme der Projektergebnisse.

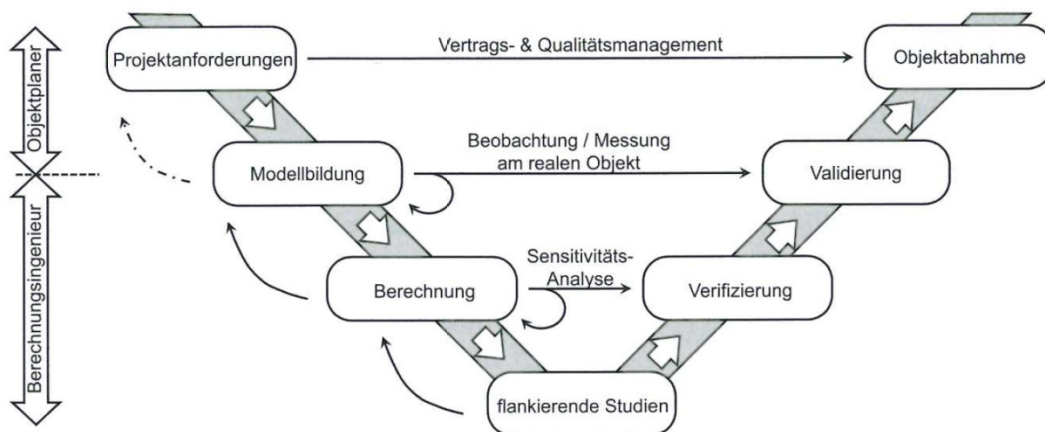


Bild 2.8: „V-Modell“ der Aufgabenanalyse und der Ergebnisintegration, DGGT (2014), Hohberg, J.-M. (2011)

2.3 Untersuchungsbedarf und ein strategischer Vorschlag für den Umgang mit den Herausforderungen

Der vorstehend gegebene kurze Überblick über die Vorgehensweisen und Empfehlungen im Hinblick auf die Durchführung von computergestützten Tragwerksanalysen zeigt, dass diese Vorgehensweisen dank einer inzwischen jahrzehntelangen Entwicklung dieses Gebietes weitgehend fundiert und generalisiert gefasst sind.

Vor diesem Hintergrund wird hier im Bereich der Geomechanik Untersuchungsbedarf erkannt in der Entwicklung möglichst spezifizierter, systematisierter und anwendungsorientierter Vorgehensweisen für ausgeprägt komplexe geotechnische Untersuchungsobjekte. Auf diesen Untersuchungsbedarf fokussiert wird im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept zur optimierten Durchführung numerischer Untersuchungen für dieses spezifische Aufgabenfeld entwickelt (im folgenden Optimierungs-Konzept genannt). Die praktische Ausrichtung dieses Konzeptes besteht dabei, in der Zielsetzung den zwei folgenden gegenläufigen Anforderungen gleichzeitig gerecht zu werden: einerseits der Gewährleistung einer ausreichenden Flexibilität des numerischen Instrumentariums für die Untersuchung unterschiedlicher Fragestellungen; andererseits der Durchführung des gesamten numerischen Untersuchungsprogramms in einem kontrollierten und akzeptablen Zeitrahmen.

Der im Konzept angewendete strategische Umgang mit den wesentlichen Herausforderungen im Rahmen der vorstehend spezifizierten numerischen Untersuchungen wird folgend vorgestellt:

(1) Strategie für den Umgang mit Imponderabilien

In dem zu entwickelnden Konzept wird in Bezug auf den Umgang mit Imponderabilien analog zu der aus der Physik bekannten Störungstheorie vorgegangen, *Kato Tosio (1966)* bzw. *Landau, L. D., Lifschitz, E. M., Ziesche, P. (2012)*.

In der Physik wird unter der Störungstheorie eine Vorgehensweise bzw. Strategie bezeichnet, die sich dadurch auszeichnet, dass in erster Annäherung zur idealisierten Abbildung eines realen Prozesses bzw. Systems auf die Erfassung von als weniger wesentlich eingeschätzten Effekten bewusst verzichtet wird und erst bei den weiteren Annäherungsschritten sukzessive immer mehr der zunächst als weniger wesentlich eingestuften Effekte in Betracht gezogen werden, um das Niveau der Realitätsnähe des aufgebauten idealisierten Systems zu erhöhen.

Im Rahmen des hier spezifizierten Untersuchungsbereiches wird dieser Ansatz aus der Störungstheorie in dem zu entwickelnden Konzept wie folgt berücksichtigt:

- Erster Schritt: Systemvalidierung in einer ersten vergleichsweise groben Annäherung durch die Feststellung und durch die Berücksichtigung der das Systemverhalten als bestimmend eingeschätzten wesentlichen bzw. dominanten Prozesse;
- Weitere Schritte: Sukzessive Annäherung an die Realität durch die Berücksichtigung weiterer und als weniger bedeutend eingeschätzter Prozesse/Effekte.

(2) Strategie für den Umgang mit der Komplexität des abzubildenden Systems

In dem zu entwickelnden Konzept wird in Bezug auf den Umgang mit der Komplexität des abzubildenden Systems entsprechend dem Modularitäts-Prinzip vorgegangen. Dieses Prinzip ist wie folgt zu charakterisieren:

„Das Konzept der Modularität wurde in der Forschung mit unterschiedlichen zugrundeliegenden Definitionen behandelt. ...Einzelne bis alle Komponenten des Systems sind dabei durch andere Komponenten austauschbar, ohne die Funktionsfähigkeit des Gesamten zu gefährden“, Schilling, M.A. (2000).

Modularitäts-Prinzip bedeutet somit eine vorausschauende Zerteilung des gesamten Systems in einzelne Teilbereiche oder Subsysteme (Module) zur Gewährleistung der Flexibilität. Dadurch soll die Modifikation einzelner Teilbereiche/Module ohne die Notwendigkeit einer aufwendigen Anpassung anderer Systembereiche ermöglicht werden.

Im Rahmen des hier zu entwickelnden Konzeptes wird das Modularitäts-Prinzip wie folgt umgesetzt:

- Strukturierung und Systematisierung des Aufbaus von numerischen Modellen höherer Komplexität (Klasse 4 und 5, siehe Kapitel 3.1) und dadurch
- Optimierung des weiteren Bearbeitungsaufwandes für eine vielseitige und auch langfristig effektive Nutzung des erstellten numerischen Instrumentariums.

Im nachstehenden Kapitel werden die Haupt-Komponenten dieses Konzeptes vorgestellt.

3 Konzept zur optimierten Durchführung numerischer Untersuchungen zum Tragverhalten von großräumigen untertägigen Systemen mit filigranen Strukturen bei Anwesenheit von Imponderabilien

3.1 Konzeptueller Ansatz für die Klassifizierung diskretisierter Modelle nach der Modellkomplexität zur präzisierten Charakterisierung des Untersuchungsobjektes

Zur präzisierten Charakterisierung des Untersuchungsobjektes wird vor der eigentlichen Konzeptbeschreibung in diesem Unterkapitel der im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Vorschlag für die Klassifizierung der zu diskretisierenden Modelle entsprechend der Modellkomplexität vorgestellt. Dazu werden Komplexitätsklassen eingeführt.

Diese Klassifikation kann wie folgt genutzt werden:

- zur Abschätzung des Bearbeitungsaufwandes für die Modellerstellung (Rechnerkapazität, Personalkapazität);
- zur Entscheidungsfindung für eine geeignete und möglichst optimale Vorgehensweise bei der Modellerstellung (methodischer Ansatz);
- zur vergleichenden Bewertung anderer Modelle anhand der Komplexitätsklasse im Rahmen von Begutachtungsprojekten.

Klassifikation nach Komplexitätsklassen für 3-dimensionale geomechanische Modelle

Für die Klassifizierung werden hier folgende Bezeichnungen eingeführt und verwendet:

- ‚Zerteilungen‘/‘Primitiven‘,
- ‚Zerteilungsfläche‘,
- ‚Übergangsbereich‘.

Unter *Zerteilungen* werden hier elementar begrenzte Raumvolumina verstanden, die ein FD- bzw. FE-Programmpaket zur Aufteilung des gesamten Modellvolumens (Berechnungsgebietes) anbietet. Die Zerteilungen werden dann programmintern in Zonen bzw. Elemente diskretisiert.

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen im gebirgsmechanischen Bereich ist die Anwendung von Programmpaketen basierend auf der Finite-Elemente-Methode (AnSys, ANSYS (2010); JIFE, Faust, B. et al. (2011); ADINA, Adina R & D Inc. (2012) u.a.) bzw. basierend auf der Finite-Differenzen-Methode (FLAC3D, Itasca (2009); ELBA, NiT (2005) u.a.) sehr weit verbreitet. Sowohl bei der FE-Methode als auch bei der FD-Methode wird die zu untersuchende Struktur als Modellkörper in eine Vielzahl von endlichen Elementen bzw. Zonen

mit zugehörigen Knotenpunkten unterteilt. Die Anzahl der Zerteilungen hat damit signifikanten Einfluss auf den Berechnungsaufwand (iterative Lösung eines linearen Gleichungssystems).

Die in dieser Arbeit durchgeführten numerischen Untersuchungen basieren auf der Nutzung des Programmpaketes FLAC3D. Das Rechenprogramm FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Itasca Consulting Group) verwendet FD-Methoden und wurde speziell für geotechnische Aufgabenstellungen entwickelt, *Itasca (2009)*. In *Bild 3.1* sind exemplarisch einige der in FLAC3D zur Verfügung stehenden Zerteilungen dargestellt.

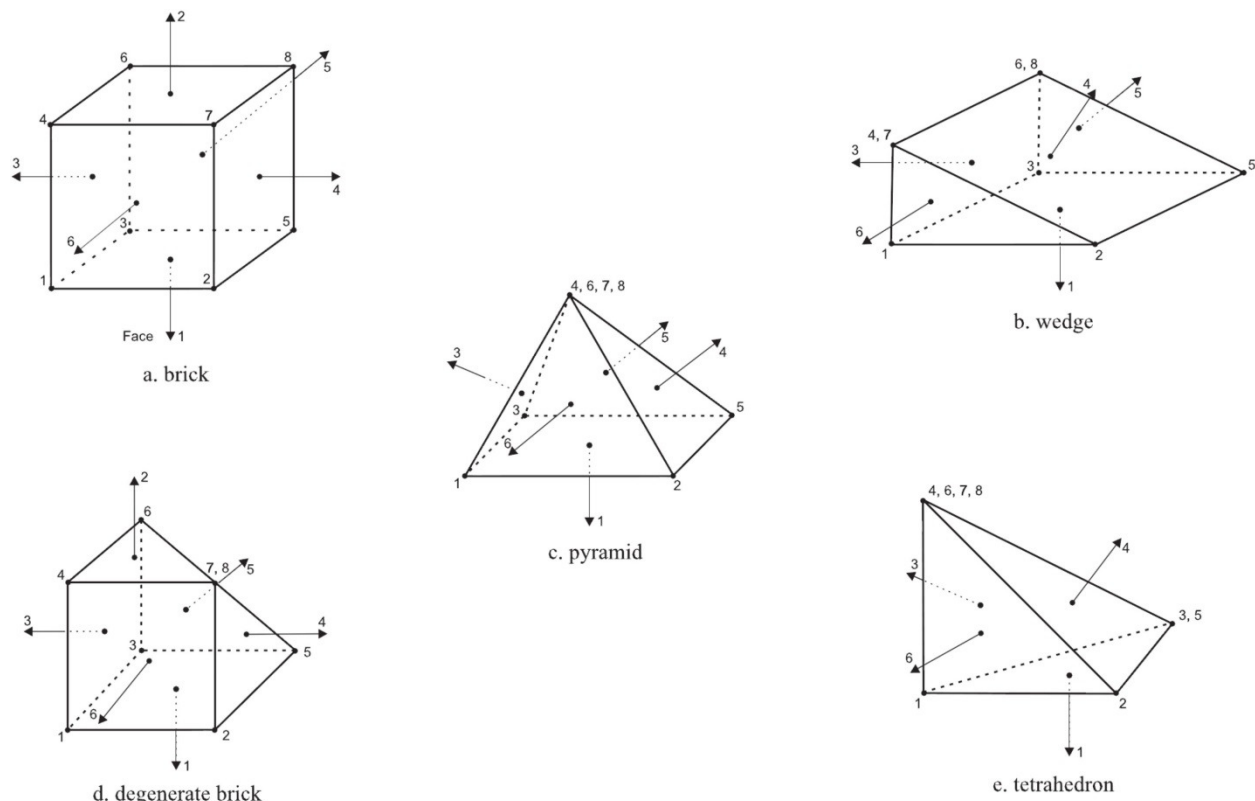


Bild 3.1: Zerteilungen/Primitiven in FLAC3D, Itasca (2009)

Eine *Zerteilungsfläche* dient als Basis für die Unterteilung des gesamten Modellvolumens mit den komplexen Geometrien der geogenen und anthropogenen Strukturen in einzelne Teilvolumina. Jedes Teilvolumen wird jeweils durch mindestens zwei Zerteilungsflächen eingegrenzt. Die Notwendigkeit für die Aufteilung in die Teilvolumina mit den begrenzenden Zerteilungsflächen ist bedingt durch die aktuell übliche Arbeitsweise basierend auf der Nutzung von zweidimensionalen Darstellungsflächen (Papier, Bildschirm).

Unter einem *Übergangsbereich* zwischen zwei Zerteilungsflächen wird der Raum der Diskretisierungs-Schicht verstanden, der durch Zerteilungen/Primitiven komplett zerlegt werden muss.

Hier werden weiterhin die Übergangsbereiche in drei Typen je nach Schwierigkeitsgrad gegliedert, *Bild 3.2*:

- *Typ I* – ein Übergangsbereich zwischen zwei Zerteilungsflächen mit geringen Unterschieden in den jeweils abzubildenden Geometrien;
- *Typ II* – ein Übergangsbereich zwischen zwei Zerteilungsflächen mit wesentlichen Unterschieden, so dass eine zusätzliche technische Zerteilungsfläche zwischen den zwei vorgegebenen Flächen notwendig wird;
- *Typ III* – ein Übergangsbereich für eine Diskretisierungs-Schicht, die durch mehr als zwei Zerteilungsflächen mit wesentlichen Unterschieden vorgegeben ist.

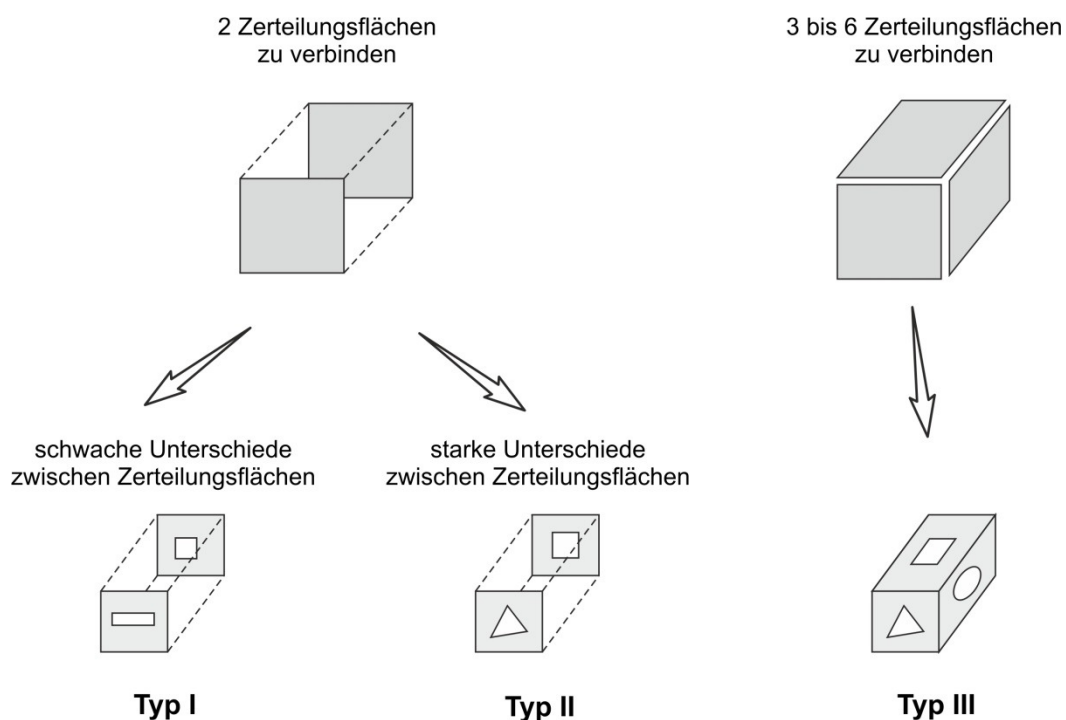


Bild 3.2: Übergangsbereichtypen für eine Diskretisierungsschicht zwischen den vorgegebenen Zerteilungsflächen

Nachfolgend werden die *Kriterien* vorgestellt, die als Basis für den Klassifizierungsaufbau dienen. Dabei handelt es sich um insgesamt drei Kriterien:

- *Kriterium Zerteilungen:*
 - Anzahl von minimal notwendigen Zerteilungen.
- *Kriterium Zerteilungsflächen, Bild 3.3:*
 - Anzahl von minimal notwendigen Zerteilungsflächen;
 - Parallelität bzw. ausgeprägte Nichtparallelität der Zerteilungsflächen;

→ Anzahl von Modellbereichen mit jeweils nichtparallelen Zerteilungsflächen.

- *Kriterium Übergangsbereiche:*

→ Komplexität der Übergangsbereiche zwischen Zerteilungsflächen, *Bild 3.2*.

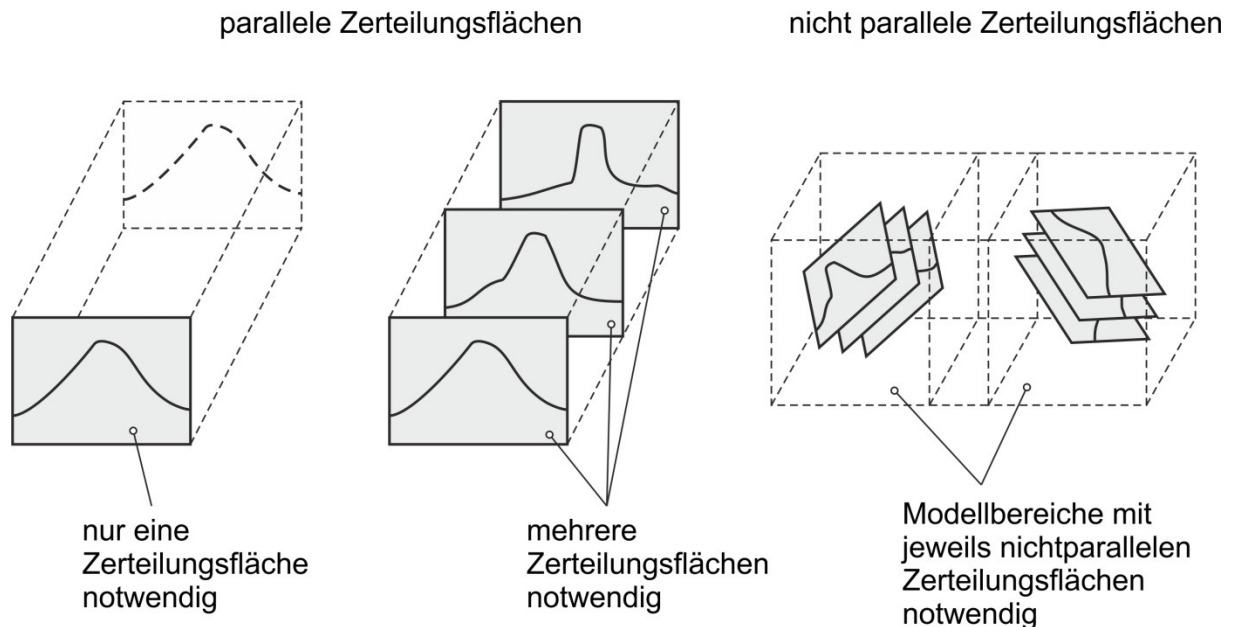


Bild 3.3: Anzahl und Parallelität bzw. ausgeprägte Nichtparallelität der Zerteilungsflächen

Anmerkung:

Die nachstehend vorgeschlagene Klassifikation ist ausgerichtet auf die Aufwandschätzung für Modelle bzw. die Beurteilung von Modellen, die unter der Randbedingung/Anforderung der Diskretisierungsrealisierung mit einem möglichst minimalen Zonenverbrauch zur Optimierung des Rechenaufwandes und somit mit der Notwendigkeit einer starken Änderung des Diskretisierungsgrades zwischen den Modellbereichen bei dem Übergang von den großräumigen geogenen Strukturen zu den filigranen anthropogenen Strukturen zu erstellen sind.

In *Bild 3.4* ist die vorgeschlagene Klassifizierung für numerische 3D-Modelle nach Schwierigkeitsklassen schematisch dargestellt. Insgesamt werden die 3D-Modelle in 5 Klassen entsprechend den vorstehend erläuterten Klassifizierungskriterien unterteilt. Die Klasse 1 für die einfachsten Modelle mit einem vergleichsweise geringen Erstellungsaufwand wird hier im Sinne des vergleichsweise geringen realisierungstechnischen Aufwandes praxisorientiert durch die Gesamtanzahl der Zerteilungen von in der Größenordnung unter 100 Zerteilungen von den weiteren Klassen abgegrenzt. Die weiteren Klassen werden durch entsprechende Kombinationen von Klassifizierungskriterien definiert.

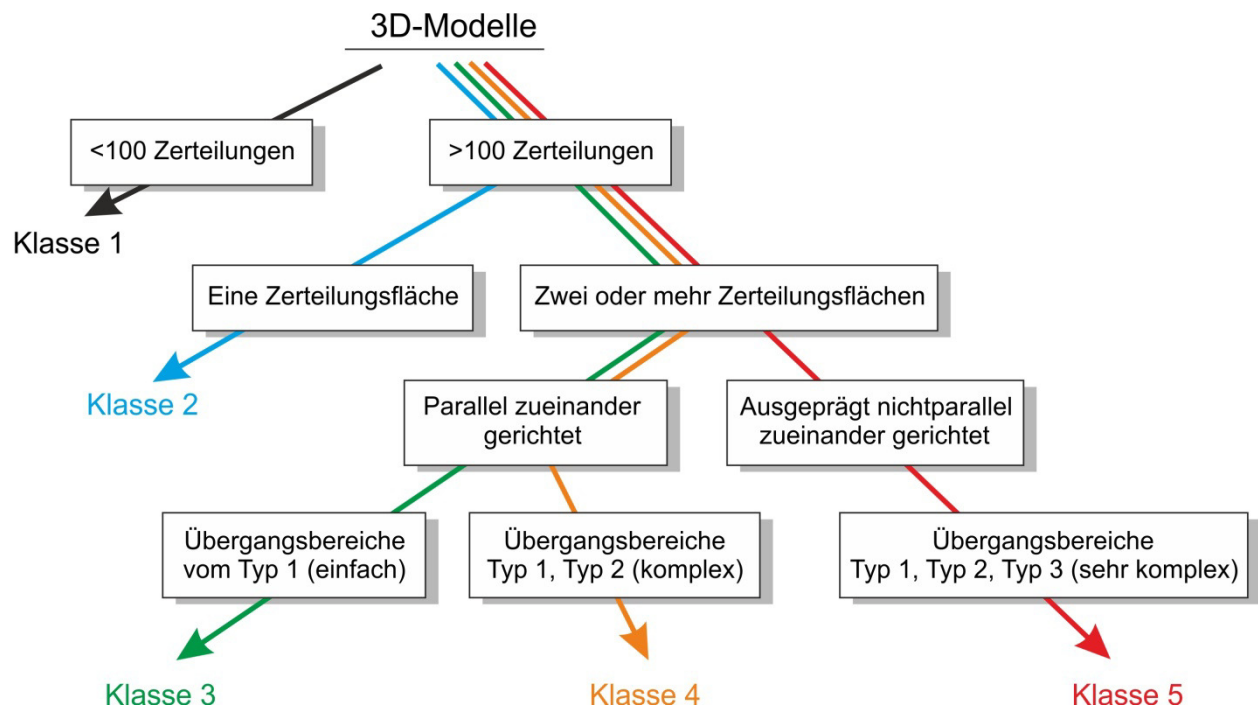


Bild 3.4: Klassifizierung der numerischen 3D-Modelle nach Schwierigkeitsklassen

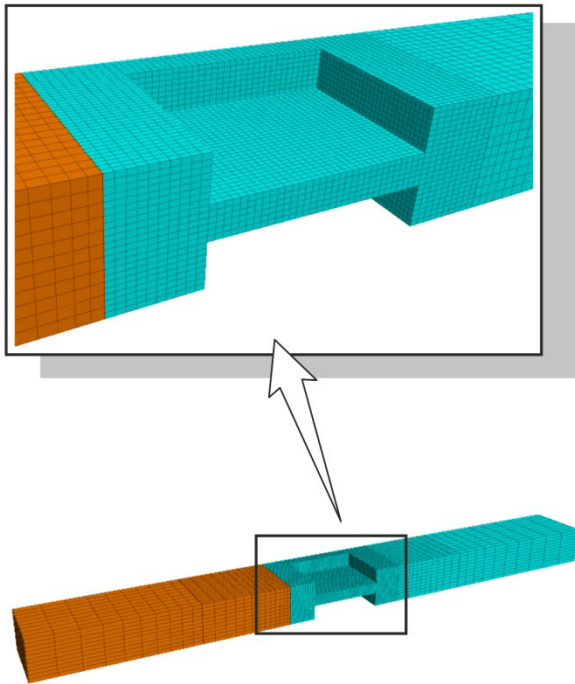
Zur Veranschaulichung der Anwendung der Klassifizierung werden nachfolgend einige Diskretisierungsbeispiele mit der jeweiligen Zugehörigkeit zur Schwierigkeitsklasse demonstriert. Entsprechend dem für diese Arbeit ausgewählten Demonstrationsbeispiel werden hier die für das Bergwerk Asse II im Lauf der Zeit erarbeiteten Diskretisierungsmodelle herangezogen. Dabei handelt es sich um eigene Berechnungsmodelle wie auch um Berechnungsmodelle des Instituts für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig.

Klasse 1

Der Schwierigkeitsklasse 1 können die zwei folgenden 3D-Modelle zugeordnet werden:

- „Ein-Kammer-Modell“ mit ca. 15 Zerteilungen aus *Lux, K.-H., Roussev, P., Dyogtyev, O., Wolters, R. (2011), Bild 3.5a;*
- „Dreidimensionales Modell 511 mS bis 574 mS“ aus *IfG Leipzig (2006a), Bild 3.5b.*

a)



b)

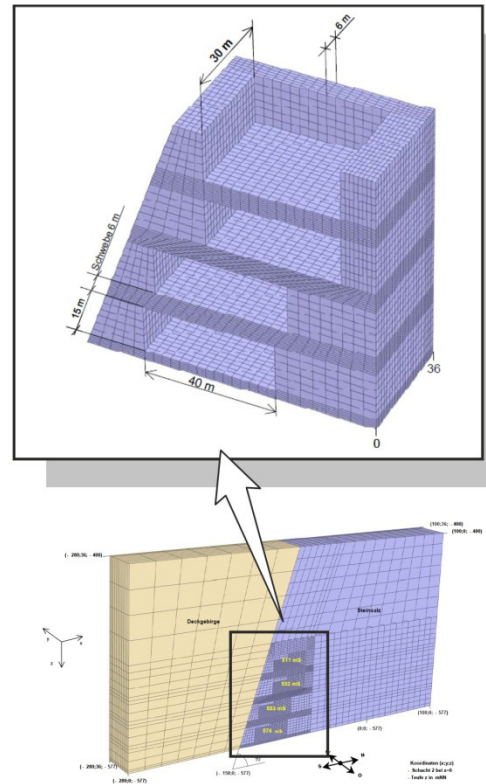


Bild 3.5: Zwei exemplarische Modelle der Schwierigkeitsklasse 1

Klasse 2

Der Schwierigkeitsklasse 2 können die zwei folgenden 3D-Modelle mit einer Zerteilungsfläche zugeordnet werden:

- „Q-3D-Modell“ mit ca. 400 Zerteilungen aus *Lux, K.-H., Roussev, P., Dyogtyev, O., Wolters, R. (2011), Bild 3.6a;*
- „3D-Modell Schachtanlage Asse“ aus *IfG Leipzig (2006a), Bild 3.6b.*

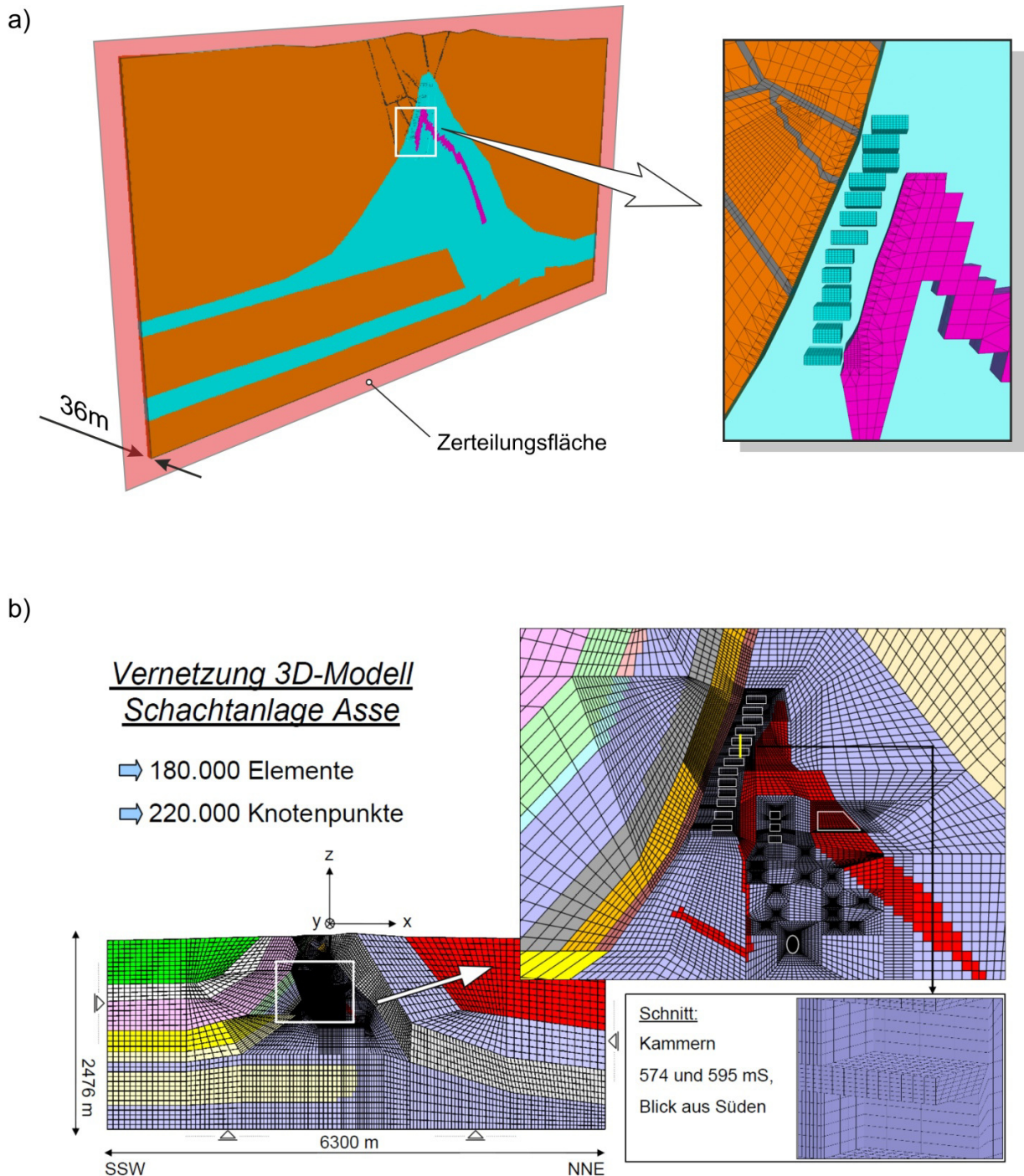


Bild 3.6: Zwei exemplarische Modelle der Schwierigkeitsklasse 2

Klasse 3

Der Schwierigkeitsklasse 3 können die zwei folgenden 3D-Modelle zugeordnet werden:

- „GTV-Modell“ mit einigen parallelen Zerteilungsflächen aus *Öko (2016), Bild 3.7a*;
- „3D-Modell für Grubengebäudehälfte“ aus *Kamlot, P., Günther, R.-M., Gärtner, G., Teichmann, L. (2015), Bild 3.7b*.

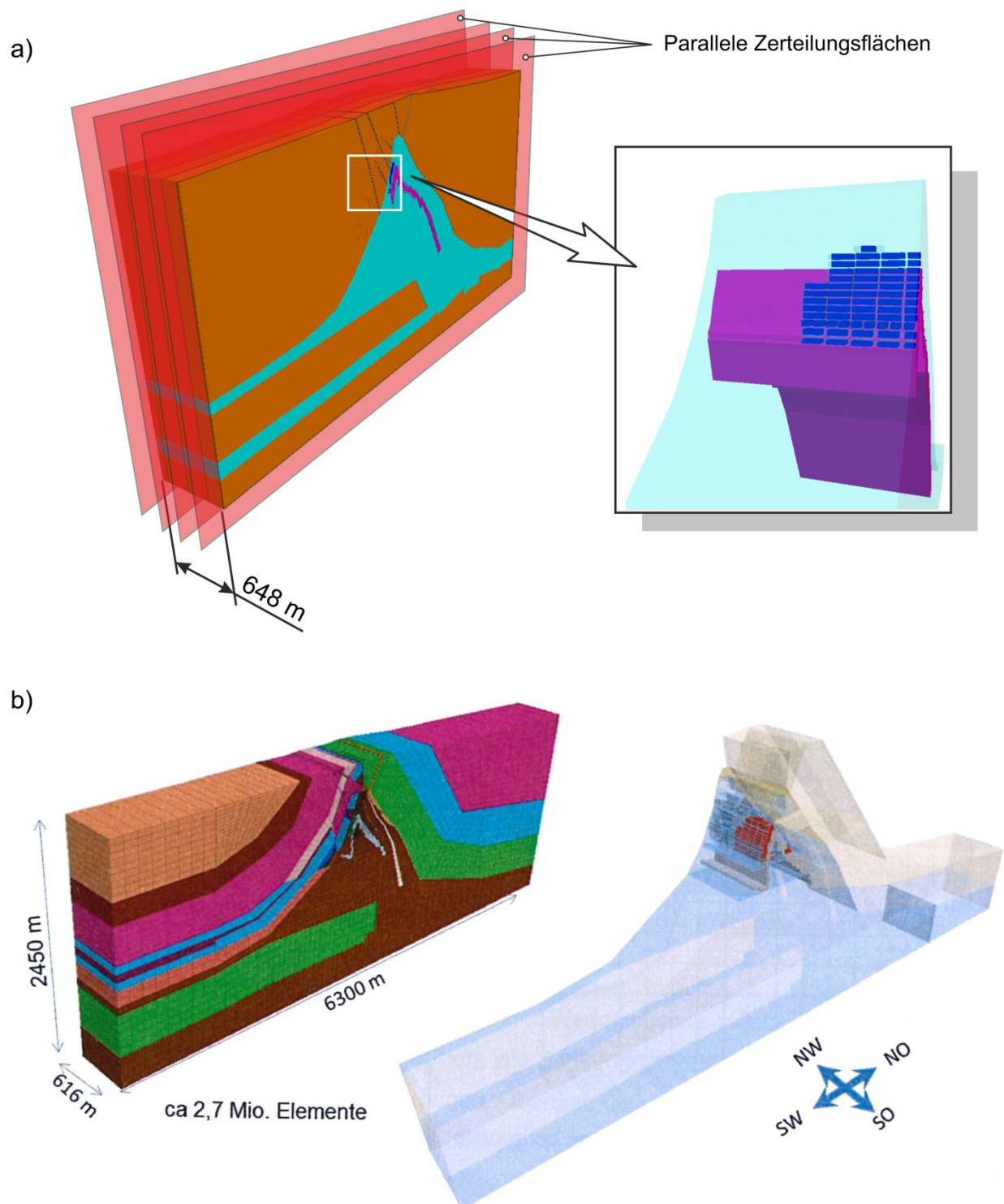


Bild 3.7: Zwei exemplarische Modelle der Schwierigkeitsklasse 3

Klasse 4

In *Bild 3.8* ist eine spezielle stark vereinfachte Ausführung eines 3D-Gesamtmodells (ohne filigrane Struktur – Grubengebäude, ohne Störungssystem u.s.w.) dargestellt. Dieses 3D-Modell wurde ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit erstellt und entspricht der Schwierigkeitsklasse 4.

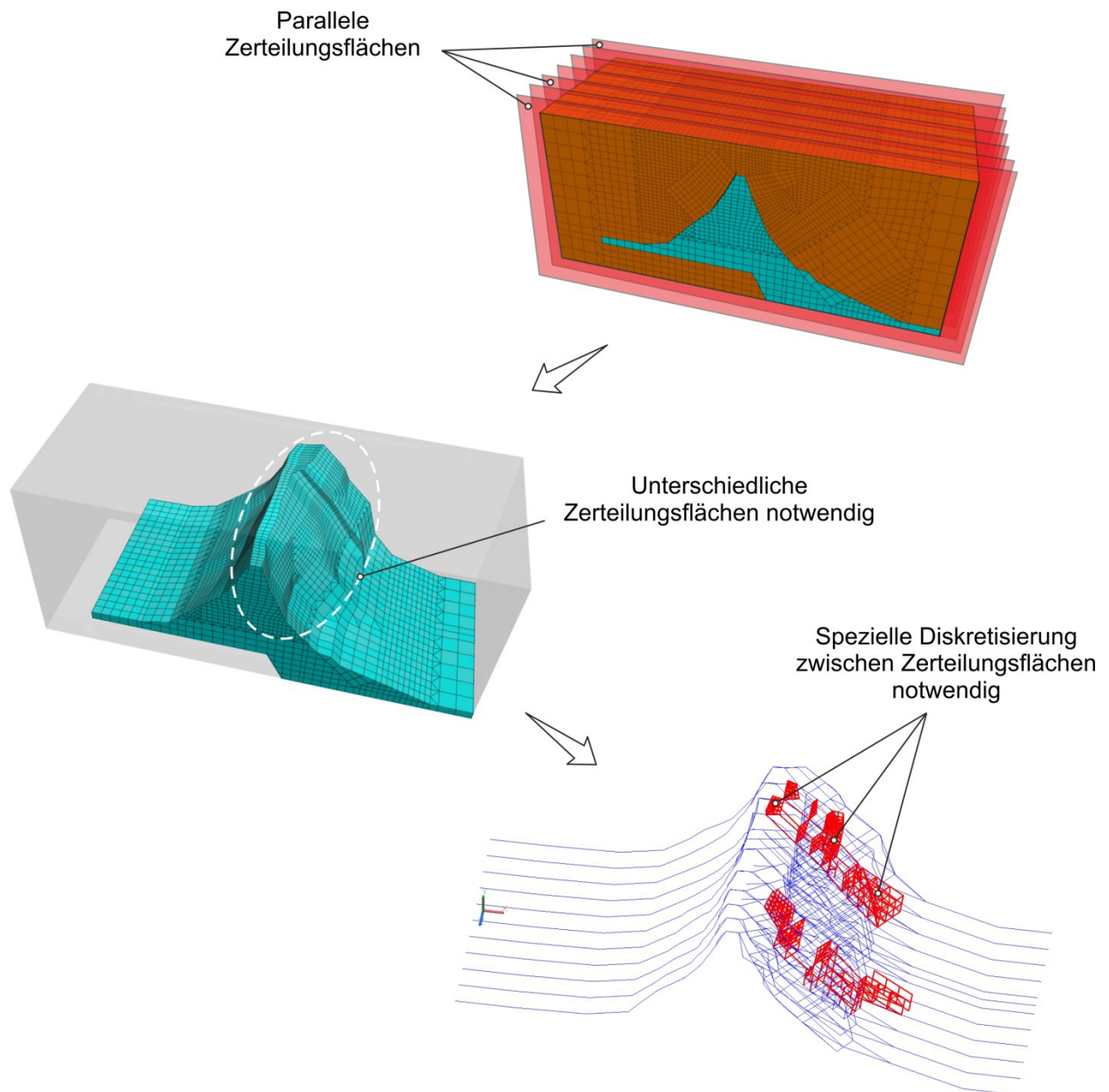


Bild 3.8: Ein exemplarisches Modell der Schwierigkeitsklasse 4

Klasse 5

In *Bild 3.9* ist ein 3D-Gesamtmodell für die Asse II/Südflanke aus *Lux, K.-H., Düsterloh, U., Lerche, S., Dyogtyev, O., Pan, T. (2015)* dargestellt. Dieses 3D-Modell entspricht der Schwierigkeitsklasse 5.

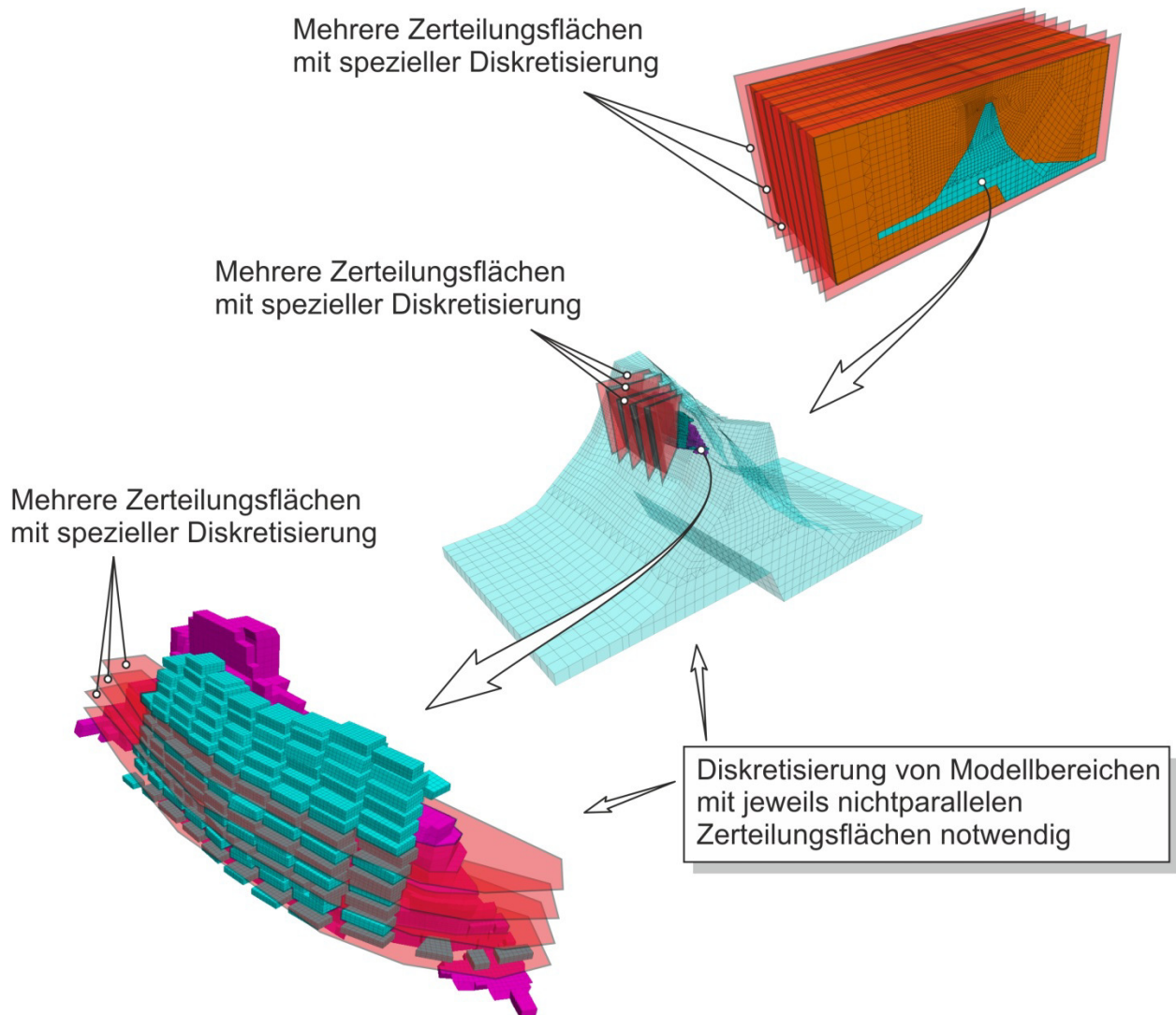


Bild 3.9: Ein exemplarisches Modell der Schwierigkeitsklasse 5

Anmerkung:

Die vorstehend gegebene Bewertung bezüglich der von IfG entwickelten Modelle im Sinne der Klassifizierung ist als exemplarisch anzusehen und unter Vorbehalt zu betrachten, bedingt durch die Unvollständigkeit der für die Klassifizierung notwendigen zur Verfügung stehenden Informationen zum Modellerstellungsvorgang. Für die eigenen 3D-Modelle wird in Kapitel 6 und in Kapitel 7 eine detaillierte Beschreibung zu der jeweiligen Modellerstellung gegeben.

3.2 Gesamtstruktur und Hauptkomponenten des Optimierungs-Konzeptes

3.2.1 Schematische Darstellung des Konzeptes

Das Optimierungs-Konzept ist in einer schrittweisen Vorgehensweise aufgebaut. In *Bild 3.10* wird eine schematische Darstellung zu der Gesamtstruktur des Konzeptes gegeben. Aus dem Bild ist erkennbar, dass dieses Konzept eine komplette Bearbeitungsreihenfolge zum gesamten Prozess numerischer Untersuchungen umfasst, angefangen von der Voranalyse des realen Systems bis hin zur Anwendung des entwickelten numerischen Instrumentariums auf weitere neue Aufgabenstellungen, ggfs. auch durch Modifikation.

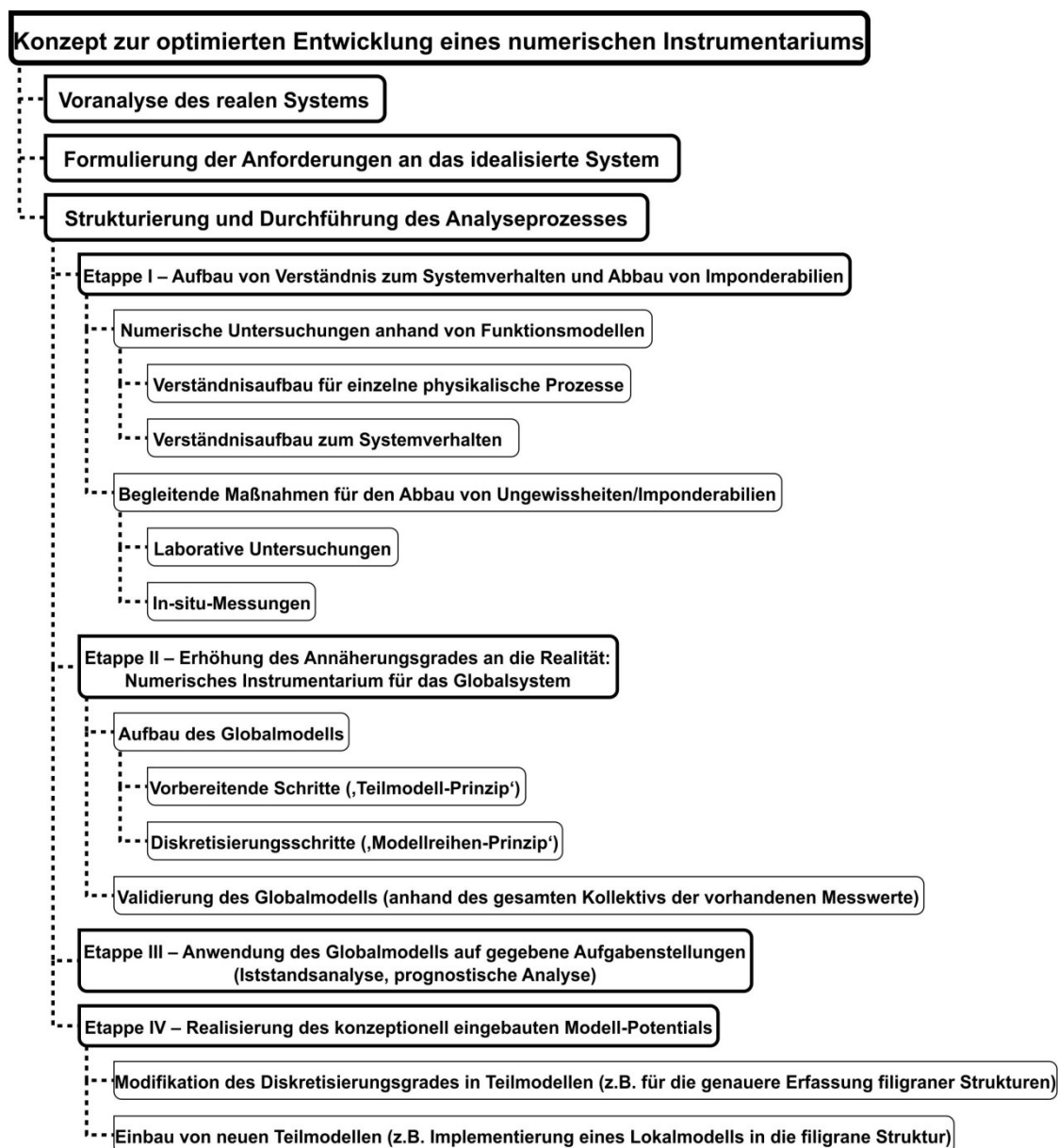


Bild 3.10: Schematische Darstellung des Optimierungs-Konzeptes

Nachstehend folgt eine ausführliche Beschreibung der aufeinander aufbauenden Hauptkomponenten des Konzeptes.

3.2.2 Voranalyse und Formulierung der Anforderungen

Die Voranalyse des realen Systems anhand der vorhandenen Datenbasis und die anschließende Formulierung der Anforderungen an das aufzubauende idealisierte numerische Modell stellen schon von sich aus eine erste wesentliche Etappe des gesamten Analyseprozesses dar.

Die *Voranalyse des realen Systems* beinhaltet folgende Bearbeitungsschritte:

- Analyse der geometrischen Daten;
- Voranalyse der vorhandenen In-situ-Messdaten;
- Identifizierung der Art und der Anzahl der mit der Bearbeitung der Aufgabenstellung verbundenen Fragestellungen;
- Analyse der Ungewissheiten/Imponderabilien.

Die *Formulierung der Anforderungen an das idealisierte System* kann folgendermaßen strukturiert werden:

- Festlegung der Schwierigkeitsklasse des zu erstellenden Modells im Sinne der in Kapitel 3.1 vorgeschlagenen Klassifizierung;
- grobe, auf Erfahrungen aufbauende Voreinschätzung des Variationsumfangs für die System-Validierung in Korrelation mit der Anzahl und der Art der festgestellten Ungewissheiten im Globalsystem;
- Abschätzung der Notwendigkeit bzw. auch der Möglichkeiten des Modifikationspotentials des aufzubauenden numerischen Instrumentariums im Hinblick auf die Bearbeitung weiterer, zukünftig möglicher Fragestellungen bzw. zur Aktualisierung des numerischen Instrumentariums entsprechend dem zukünftigen erhöhten Erkenntnisstand (Reduzierung von Modell-Ungewissheiten z.B. durch vertiefte Erkundung oder weitere Messbefunde).

Im Ergebnis dieser Bearbeitungsschritte kristallisieren sich konkrete Zielsetzungen und Rahmenbedingungen als Voraussetzung bzw. als erforderliche Eingangsinformationen für die Bearbeitung der weiter nachfolgenden Etappen des eigentlichen numerischen Analyseprozesses heraus.

3.2.3 Etappe I – Aufbau eines grundsätzlichen Verständnisses zum Systemverhalten

Im Rahmen des Optimierungs-Konzeptes ist die Notwendigkeit dieser Etappe der ausgeprägten Komplexität des zu untersuchenden Objektes und des schließlich aufzubauenden numerischen Systems geschuldet. Diese Etappe ist als eine Vorstufe zu dem sukzessiven Aufbau eines Systemverständnisses anzusehen, der vorerst anhand von Funktionsmodellen erfolgt. Unter Funktionsmodellen werden hier vergleichsweise einfache numerische Modelle verstanden, die nur einzelne Teile bzw. nur einen Teil der systemrelevanten Prozesse/Bereiche abbilden, nicht aber zur endgültigen Bearbeitung der formulierten Fragestellungen auf dem angestrebten Niveau der Realitätsnähe herangezogen werden können.

Nachfolgend werden die durch numerische Untersuchungen anhand von Funktionsmodellen angestrebten Zwischenziele in strukturierter Form aufgelistet. Dabei handelt es sich um:

(1) Verständnisaufbau zur Abbildung einzelner physikalischer Prozesse und Demonstration der Funktionsweise

- Überprüfung der Plausibilität in der Prozessabbildung;
- Feststellung des Erweiterungs-/Präzisierungsbedarfes;
- Präzisierung in der physikalischen Abbildung relevanter Prozesse
 - Aufbau/Erweiterung phänomenologischer Vorgehensweisen zur Abbildung einzelner relevanter Prozesse, die mit den verfügbaren und zunächst angewendeten Stoffmodellen noch nicht hinreichend abbildbar sind;
 - Erweiterung/Präzisierung der Stoffmodelle zur möglichst realitätsnahen Beschreibung des Materialverhaltens in Bezug auf relevante Prozesse.

(2) Verständnisaufbau zum Systemverhalten

- Feststellung der relevanten, das Systemverhalten bestimmenden Prozesse sowie Untersuchung der Wechselwirkung zwischen den Prozessen;
- Festlegung von charakteristischen Messwerten zur Validierung des jeweiligen Funktionsmodells;
- Validierung des jeweiligen Funktionsmodells durch den Vergleich mit den charakteristischen Messwerten, wobei bedingt durch die Anwesenheit von Imponderabilien die Identifizierung optimaler Validierungsparameter notwendig ist.

Weiterhin werden kurz fakultative Bearbeitungsschritte im Rahmen dieser Etappe vorgestellt, die zur Unterstützung numerischer Untersuchungen dienen können, jedoch nicht immer realisierbar sind.

(3) Begleitende Maßnahmen für den Abbau von Ungewissheiten/Imponderabilien

- Laborative Untersuchungen zur
 - o Ermittlung/Präzisierung des Materialverhaltens für einzelne Homogenbereiche;
 - o Ermittlung/Präzisierung der lokationsspezifischen Materialkennwerte für einzelne Homogenbereiche;
- In-situ-Untersuchungen (nach Möglichkeit und Bedarf) zur
 - o Durchführung zusätzlicher, präzisierender bzw. systematisierter Messungen.

Folgende Ergebnisse/wesentliche Erkenntnisse sind nach der Bearbeitung der Etappe I als eine notwendige Voraussetzung für den Start der Etappe II zu erreichen:

- Verständnisaufbau und Beherrschung bzw. Weiterentwicklung in Bezug auf die Erfassung einzelner Prozesse;
- Verständnisaufbau in Bezug auf das Systemverhalten – Erkennung bzw. Aufstellung von Hypothesen bezüglich der das Systemverhalten bestimmenden relevanten Prozesse und ihrer Wechselwirkungen;
- Einschätzungen zu den Modellierungsparametern für das Gesamtmodell für die Etappe II mit
 - o Einschätzung des minimal notwendigen Diskretisierungsgrades der relevanten Teilbereiche (bezüglich der Prozessabbildung/Prozesserfassung);
 - o Einschätzung der maximalen handhabbaren Modellgröße/Zonenzahl (bezüglich des Validierungsaufwandes vor dem Hintergrund der erforderlichen Variationsanalysen).

3.2.4 Etappe II – Aufbau und Validierung eines komplexen numerischen Instrumentariums für das Globalsystem

In dieser Etappe wird das komplexe numerische Instrumentarium für die Analyse des Gesamtsystems aufgebaut zur umfassenden Bearbeitung der formulierten Fragestellungen auf dem angestrebten Niveau der Realitätsnähe. Die in diesem Rahmen durchzuführenden Bearbeitungsschritte werden nachfolgend beschrieben:

(1) Vorbereitende Schritte zum Aufbau des Globalmodells

- Erstellung von 3D-Zeichnungen des gesamten zu untersuchenden 3D-Systems (mit Extrapolation auch in die Bereiche, die aus geomechanischer Sicht zur Erfassung der

großräumigen Tragwirkungen erforderlich, aber nicht dokumentiert sind) mit dem erforderlichem Grad der Idealisierung der geotektonischen Situation und der Geometrie der gesamten technischen Konfiguration, z.B. Grubengebäude oder Kavernenanlage → Globalmodell;

- Aufteilung des Globalmodells in Teilmodelle entsprechend der Geometrie der anthropogenen und der geogenen Strukturen („Teilmodell-Prinzip“ entsprechend dem Modularitäts-Prinzip);
- Vornahme vorausschauender Aufteilungen in der 3D-Zeichnung für mit Imponderabilien behaftete Bereiche zur Vorbereitung späterer geometrischer Variationen ausgewählter Systemelemente.

(2) Diskretisierung des Globalmodells

- Festlegung der Feinheitsgrade der FD-Diskretisierung innerhalb der Teilmodelle;
- Festlegung von Übergangsbereichen für einen optimalen/stufenweisen Übergang von einer feineren Diskretisierung (filigrane Struktur) zu einer gröberen Diskretisierung (globale Struktur);
- Diskretisierung des 3D-Basismodells mit ausführlicher Dokumentation entsprechend den Teilmodellen (für Flexibilität bei späteren Diskretisierungsänderungen);
- nach Möglichkeit bei Bedarf Erstellung einer Modellreihe (Modellreihen-Prinzip auf der Grundlage eines Basismodells).

(3) Validierung des Globalmodells

- Bearbeitung und Systematisierung der insgesamt vorhandenen In-situ-Messdaten;
- Festlegung von charakteristischen In-situ-Messwerten;
- Validierung des numerischen Modells anhand von charakteristischen Messwerten;
- Vergleich der numerischen Ergebnisse mit dem gesamten Kollektiv der Messwerte.

3.2.5 Etappe III – Anwendung des Globalmodells auf die vorgegebenen Fragestellungen

Als Ergebnis der Etappe II ist ein numerisches Instrumentarium aufgebaut, das zur Bearbeitung der vorgegebenen Fragestellungen angewendet werden kann. Die Berechnungsbefunde aus den numerischen Simulationen liefern die Grundlage für bewertende Aussagen, z.B. mit Hilfe eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Die Entwicklung oder Diskussion eines derartigen

Konzeptes ist allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit. Mit der Bearbeitung der Fragestellungen sind die Hauptziele eines Forschungsprojektes bzw. einer Standsicherheitsanalyse erreicht. Fragestellungen können sein:

- Bewertung des aktuellen Trag- bzw. Verformungsverhaltens;
- Kurzzeitprognose zum Trag- bzw. Verformungsverhalten;
- Langzeitprognose zum Trag- bzw. Verformungsverhalten.

3.2.6 Etappe IV – Realisierung des eingebauten Modifikationspotentials

In der Etappe IV kann bei Bedarf das in den vorherigen Etappen im Rahmen des angewendeten Konzeptes in das erstellte numerische Instrumentarium eingebaute Modifikationspotenzial realisiert werden, um einerseits das Niveau der Realitätsnähe in Bezug auf die gegebenen Fragestellungen zu erhöhen und andererseits neue Fragestellungen zu bearbeiten.

Dabei sind z. B. folgende zwei Arten an Modifikationen vorstellbar:

- Modifikation des Diskretisierungsgrades in einem oder in mehreren Teilmodellen (z.B. für die filigrane Struktur);
- Einbau von neuen Teilmodellen in das 3D-Gesamtmodell (z.B. ein Lokalmmodell innerhalb der filigranen Struktur).

Die Realisierung des hier vorgestellten Konzeptes wird in den folgenden Kapiteln anhand eines Beispiels demonstriert. Als Beispiel wird das geomechanische System der Schachtanlage Asse II/Südflanke herangezogen.

4 Anwendungsbeispiel Schachtanlage Asse II: Untersuchungsobjekt und Untersuchungsziele

4.1 Untersuchungsobjekt

4.1.1 Gebirgsbau im Bereich der Schachtanlage Asse II

Um 1900 begann auf dem Asse-Heeseberg-Höhenzug nördlich des Harzes der Salzbergbau, *Bild 4.1*. Im Lauf der Zeit wurden insgesamt drei Schachtanlagen angelegt mit den Bezeichnungen Asse I, Asse II und Asse III. Die Anlagen Asse I (das Bergwerk musste im Juli 1906 wegen Wassereinbruch aufgegeben werden) und Asse III (der Schacht wurde von 1911 bis 1921 gebohrt, die Arbeiten für die Nutzung 1924 eingestellt) sind schon seit Jahrzehnten mit Wasser vollgelaufen und abgesoffen.



Bild 4.1: Tageriss mit Lage der Schachtanlagen auf der Asse und Positionen der Vertikalschnitte, Wallmüller (2012)

Im Fokus dieser Arbeit steht die geomechanische Situation in der Schachtanlage Asse II. Dieses Salzbergwerk wurde im Zechsteinsalz der Leineserie (Na3) und der Staßfurtserie (Na2) in einem

etwa 8 km langen Salzsattel aufgefahren, der von NW nach SE streicht. Der Vertikalschnitt 2 (Lage des Schnittes in *Bild 4.1*) verläuft etwa in der Mitte des Bergwerks senkrecht zum Streichen des Salzsattels und zeigt, dass die Südflanke des Salzsattels mit einem Winkel von ca. 70° wesentlich stärker einfällt als die Nordflanke, *Bild 4.2*.

Die geologische Struktur des Asse-Sattels wurde durch halokinetische Prozesse geprägt. Die den Zechsteinhorizont überlagernden Schichtsedimente sind infolge der Salzstockhebung (Halokinese) steil aufgerichtet und insbesondere im Bereich der Salzstockkuppe tektonisch zerlegt worden.

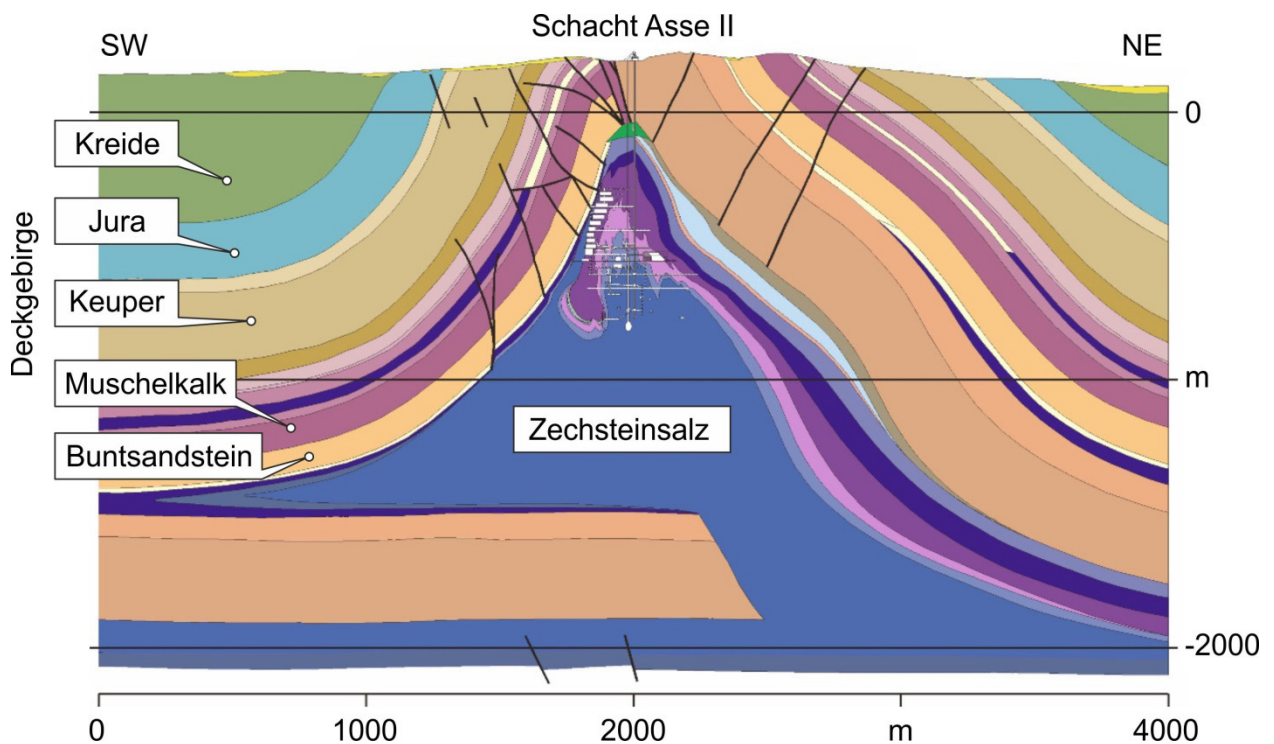


Bild 4.2: Geotektonischer Bau des Asse-Schachtes (entspricht der Position des Schnittes 2, ERCOSPLAN (2004))

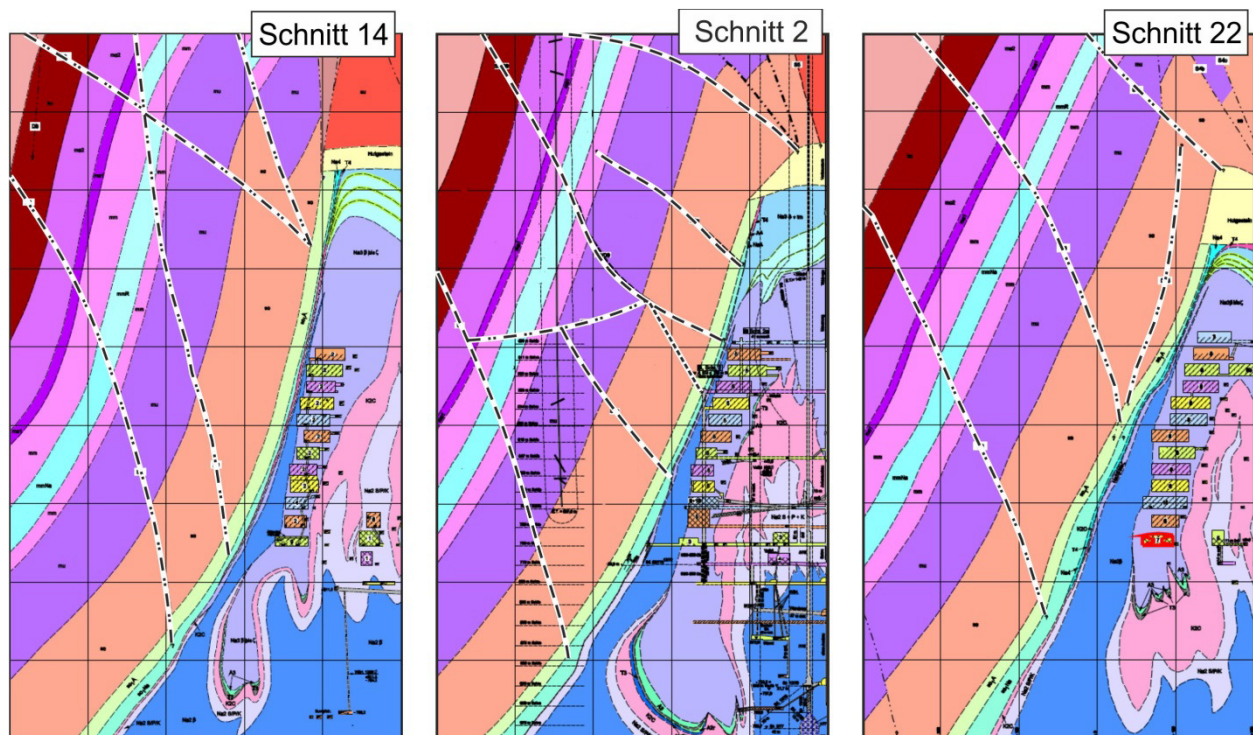
Im nichtsalinarem Deck- und Nebengebirge sind sowohl im Streichen der Lagerstätte wie auch querschläbig dazu Störungszonen angelegt. Ihre räumliche Positionierung beruht auf der vorhandenen geotektonischen Charakterisierung des Störungs- bzw. Großluftsystems im Bereich des Asse-Sattels.

Das Steinsalzbaufeld an der Südflanke wurde in unmittelbarer Nähe zum südlichen Deckgebirge aufgefahren. Auf den oberen Sohlen weist die Steinsalzbarriere zum Deckgebirge nur minimale

Mächtigkeiten von weniger 10 m auf. Das vom Grubengebäude unmittelbar beeinflusste Deckgebirge besteht aus den triassischen Gesteinen des Buntsandsteins und des Muschelkalks.

Die Lage der Störungszonen ist aus den Schnitten 14, 2 und 22 zu sehen, *Bild 4.3*. Nur einige der postulierten Störungszonen sind allerdings durch Tiefbohrungen nachgewiesen.

Für die Analyse des Tragverhaltens der Süd-Flanke ist die durch die Störungszonen verursachte Zerlegung des nichtsalinaren Deckgebirges in großräumige Gebirgsblöcke von zentraler Bedeutung.



Störungen: - - - - nachgewiesen, - · - · - vermutet, · · · · · wahrscheinlich

Bild 4.3: Kluftsystem in Vertikalschnitten neben dem Grubengebäude der Schachtanlage Asse II, Wallmüller (2012)

4.1.2 Untertägige Struktur der Schachtanlage Asse II

Im Bergwerk Asse II wurden entsprechend *Stockmann & Hensel (2003)* in den Jahren 1909 bis 1964 die folgenden drei Baufelder für die Mineralgewinnung aufgefahren, *Bild 4.4*:

- Carnallititbaufeld an der Nordflanke mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 1.000.000 m³, wobei bereits während der Gewinnung die Hohlräume größtenteils wieder versetzt worden sind,
- Steinsalzbaufeld an der Südflanke (Leine-Steinsalz oder jüngeres Steinsalz) mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 3.400.000 m³ sowie
- Steinsalzbaufeld im Satteln (Staßfurt-Steinsalz oder älteres Steinsalz) mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 440.000 m³.

Die radioaktiven Abfälle befinden sich in Steinsalzkammern im Satteln im Teufenniveau 750 m und 725 m sowie an der Südflanke im Teufenniveau 750 m und 511 m. In *Bild 4.4* sind die Abbaukammern mit radioaktiven Abfällen in rot markiert, *IfG Leipzig (2006a)*.

Aus *Bild 4.4*. ist ersichtlich, dass im Grundsatz neben den Auffahrungen in Teufen größer 750 m drei voneinander getrennte Baufelder existieren. Da das Baufeld im Carnallitit schon seit langem versetzt ist und das im Satteln positionierte Steinsalzabbaufeld relativ geringe Ausmaße erreicht, ist das Baufeld im Leine-Steinsalz (Na₃) an der Asse-Südflanke auf Grund seiner Größe und Lage für die gegenwärtigen gebirgsmechanischen Reaktionen des Gesamtsystems bestimmend. Bezogen auf den querschlägig zum Streichen des Asse-Sattels erfolgenden Lasteintrag aus dem Deckgebirge der Asse-Südflanke ergibt sich für dieses Baufeld in steiler Lagerung eine gebirgsmechanisch wirksame Baufeldgröße von 650 m Länge und 275 m Höhe entsprechend einer subvertikalen Abbaufäche von 178.750 m².

Die vertikal zwischen den Abbaukammerreihen angeordneten Pfeiler und die zwischen den Abbaukammern horizontal verlaufenden Schweben innerhalb einer Kammerreihe stellen die Tragelemente des Steinsalzbaufeldes an der Südflanke dar. Das Haupttragelement ist der 20 m breite Zentralpfeiler zwischen den Abbaureihen 4 und 5, *Bild 4.5*. Die Pfeiler werden sowohl in querschlägiger als auch in vertikaler Richtung belastet, wobei die Hauptlast querschlägig zum Streichen des Asse-Sattels in die Pfeiler eingetragen wird, *IfG Leipzig (2006a)*.

Das Baufeld an der Südflanke wurde in der Abbauphase beginnend auf der 750-m-Sohle bis zur 490-m-Sohle aufwärts mit 13 Sohlen und in der Regel 9 Abbaukammern aufgefahren, *Bild 4.5*. Somit entstand ein rasterartiges Abbau-Pfeiler-Schweben-System, *IfG Leipzig (2006a)*.

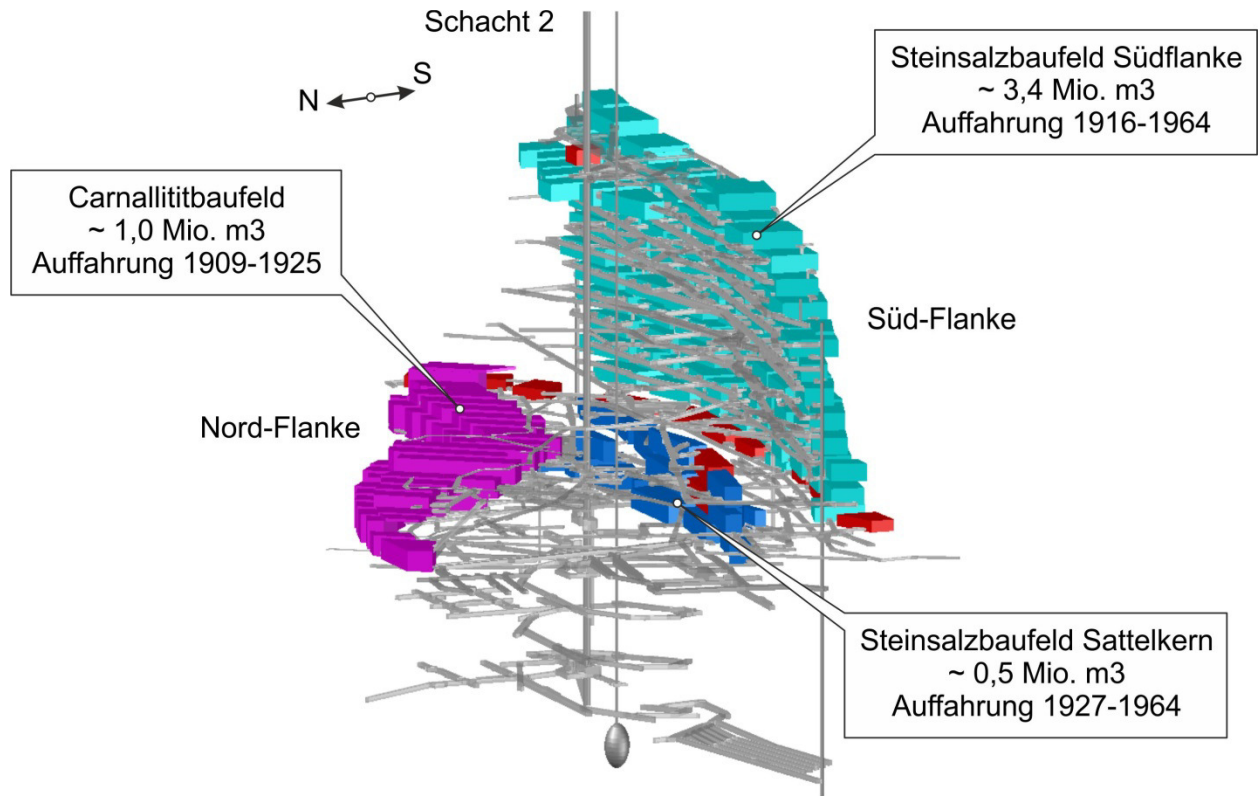


Bild 4.4: Darstellung des Grubengebäudes der Schachtanlage Asse II

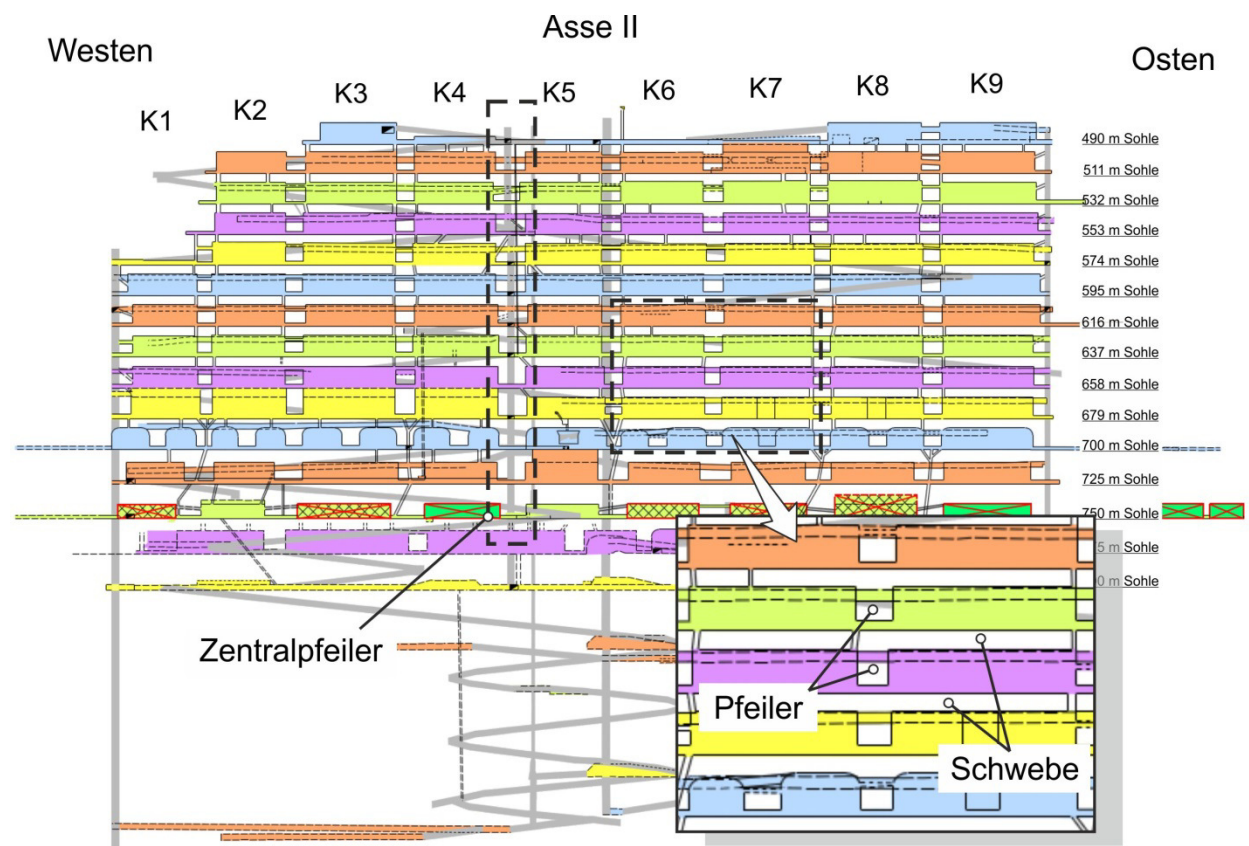


Bild 4.5: Darstellung des Steinsalzbaufeldes an der Südflanke (Schnitt I, nach Wallmüller (2012))

4.1.3 Geschichtliche Entwicklung des Grubengebäudes

Die Entwicklung des Grubengebäudes weist eine über 100-jährige Geschichte mit mehreren, aus geomechanischer Sicht signifikant unterschiedlichen Phasen auf:

(1) Abbauphase 1909-1964

Die Abbauphase ist im wesentlichen gekennzeichnet durch die Auffahrung der drei Baufelder für die Mineralgewinnung:

- Carnallititbaufeld an der Nordflanke im Zeitraum von 1909 bis 1925,
- Steinsalzbaufeld an der Südflanke im Zeitraum von 1916 bis 1964,
- Steinsalzbaufeld im Satteln im Zeitraum von 1927 bis 1963.

Genaue Zeitangaben für die Auffahrung der Hohlräume sind aus dem Risswerk zu entnehmen, *Wallmüller (2012)*.

Im Zeitraum von 1916 bis 1964 muss das aufgefahrene Pfeiler-Schweben-System aufgrund der Abbauparameter gebirgsmechanisch als ein nachgiebiges Tragsystem bewertet werden, welches mit plastischen Deformationen, Kriechverformungen sowie lokalen Prozessen auf die eingetragene Gebirgsspannung reagiert hat bzw. gegenwärtig noch reagiert, *Colenco (2005)*.

(2) Stillstandsphase 1965-1994 mit Durchführung von Versuchen zur Endlagerung

Nach Beendigung der Abbauphase folgte ein Zeitabschnitt ohne weitere bergmännische Gewinnung, der als Stillstandsphase zu bezeichnen ist. Die Stillstandsphase von 1965 bis 1994 ist dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrzahl der Abbaue an der Asse-Südflanke unversetzt dem Gebirgsdruck ausgesetzt war. Über die lange Standzeit von ca. 29-75 Jahren bis zum Ende der Stillstandsphase war infolge des nachgiebigen Tragverhaltens mit begrenzter Tragfähigkeit in einem Großteil der Tragelemente die Tragfähigkeitsgrenze überschritten. Die Pfeiler und Schweben gerieten in zunehmend stärkerem Maße in einen Entfestigungszustand. Der Lastabtrag erfolgte verstärkt über das Nebengebirge an der Südflanke, das seinerseits mit Scherdeformationen auf die Gebirgsspannungsumlagerung reagierte. In den Scherbändern und Klüftbereichen hat sich der Durchtrennungsgrad soweit erhöht, dass Deckgebirgswässer zutreten und auch gebirgsmechanisch wirksam werden konnten, *Colenco (2005)*.

In dieser Stillstandsphase sind nach Übernahme des Bergwerks durch die Bundesrepublik Deutschland und Umrüstung in ein Versuchsbergwerk im Zeitraum von 1967 bis 1978 im Rahmen von Versuchen zur Endlagerung radioaktive Abfälle in der Schachtanlage Asse in mehreren Kammern im jüngeren Steinsalz (*Na3*) der Südflanke auf der 750-m-Sohle, in zwei

Kammern im älteren Steinsalz (Na_2) auf der 750-m- und 725-m-Sohle und in einer Kammer im jüngeren Steinsalz auf der 511-m-Sohle eingelagert worden. Insgesamt wurden nach Angaben des ehemaligen Betreibers HMGU etwa 125.787 Fässer mit schwach- und mittelradioaktiven Abfällen eingelagert, *BfS (2015)*. Außerdem ist zu Versuchszwecken der sogenannte Tiefenaufschluss mit der Auffahrung von Hohlräumen unterhalb der 750-m-Sohle erfolgt.

Da die Versuche zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und die damit implizierten Folgewirkungen im Rahmen dieser auf geomechanische Fragestellungen ausgerichteten Arbeit keine Bedeutung haben, wird hier auf die einschlägigen Informationen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) verwiesen, z.B. Asse-Einblicke (<http://www.asse.bund.de>).

(3) Versatzphase 1987-2003

Eine der wichtigsten Einflussgrößen auf das Tragverhalten des Grubengebäudes in neuerer Zeit sind die in situ zwischen den Jahren 1978 und 1998, die über die zunehmend propagativ verlaufenden Gebirgsentfestigungen hinaus verzeichneten Schwebenbrüche, die ein überbeanspruchungsbedingtes totales Versagen dieser Tragelemente kennzeichnen, *Bild 4.6*. Diese Schwebenbrüche führen grundsätzlich zu einer signifikanten Destabilisierung des Tragsystems.

Ein Teil der Abbaue wurde mit Eigenversatz bereits in der Zeitperiode 1987-1995 verfüllt. Das betrifft Abbaue auf der 725-m-Sohle und zum Teil auf der 700-m-Sohle, *Bild 4.6*.

Die ablaufenden Entfestigungsprozesse der Tragelemente im Steinsalzbaufeld an der Asse II/Südflanke erforderten dann allerdings eine vollständige Verfüllung sämtlicher noch offener Abbaue.

Die sohlenweise Versatzeinbringung ab 1995 in das ca. 2.200.000 m³ umfassende, noch offene Hohlraumvolumen der Abbaue des Steinsalzbaufeldes an der Südflanke erfolgte durch das Einbringen von Fremdversatz, hier durch das Einblasen von Salz der Halde Ronnenberg unter Zugabe geringerer Mengen gesättigter Salzlösung, *Bild 4.6*. Anfang 2004 waren alle Abbaue an der Asse II/Südflanke mit Salz versetzt, *Colenco (2005)*.

(4) Firstspaltverfüllungsphase 2010 bis aktuell

Zur weiteren Stabilisierung des Grubengebäudes wurden seit 2010 die nach der Versatzeinbringung durch Kompaktion des Versatzmaterials entstehenden Firstspalten verfüllt. Der Zeitrahmen und die Reihenfolge der Firstspaltverfüllung sind ebenfalls *Bild 4.6* zu entnehmen.

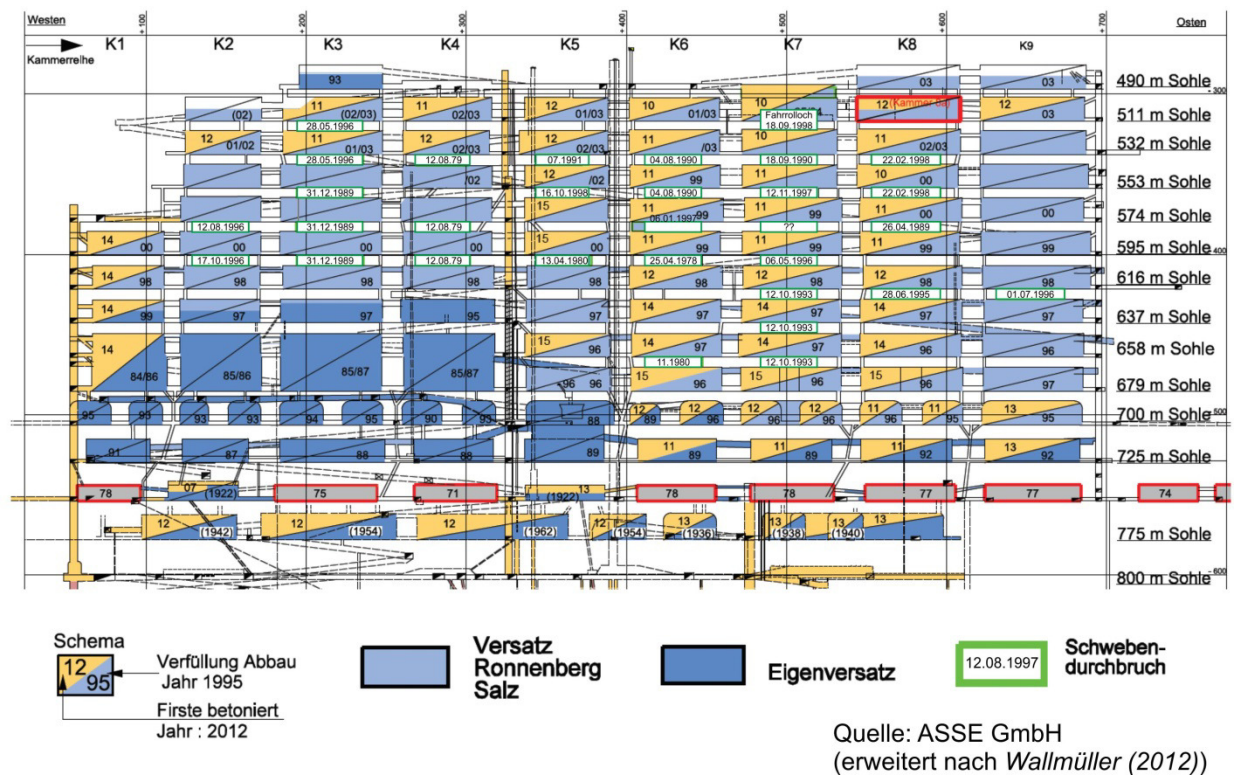


Bild 4.6: Schwebenbrüche, Versatz und Firstspaltverfüllung in der Südflanke

4.2 Untersuchungsziele

Die in den Kapiteln 6 bis 8 dieser Arbeit vorgestellten numerischen Untersuchungen sind im Rahmen folgender aufeinander aufbauender Forschungsprojekte durchgeführt worden:

- 1) „*Erste gebirgsmechanische Impressionen zum längerfristigen Tragverhalten*“ (2010-2011);
- 2) „*Reduzierung von identifizierten Defiziten für die Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit*“ (2011-2012);
- 3) „*Erweiterte gebirgsmechanische Untersuchungen zum längerfristigen Tragverhalten der Schachtanlage Asse II im Hinblick auf die Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit*“ (2012-2015).

Aus den im Rahmen dieser Projekte durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wird in den nachstehenden Kapiteln die Bearbeitung folgender zentraler Zielstellungen demonstriert:

- *Instrumentariumsaufbau*
Aufbau eines numerischen Instrumentariums für die Abbildung des gesamten gebirgsmechanischen Systems;
- *Re-Analyse/Validierung*
Validierung des Instrumentariums anhand einer Re-Analyse durch den Vergleich der Simulationsbefunde mit charakteristischen In-situ-Messwerten;
- *Kurzzeitprognose*
Anwendung des aufgebauten Instrumentariums zur Erstellung einer Kurzzeitprognose zum Trag- und Verformungsverhalten.

Es wird somit der Aufbau eines numerischen Instrumentariums angestrebt, das im Rahmen der getroffenen Annahmen und Voraussetzungen eine aus gebirgsmechanischer Sicht plausible und angemessen realitätsnahe retrospektive Abbildung von globalen geomechanischen Prozessen ermöglicht und das damit dann auch als ein geeignetes Instrumentarium zur Erstellung von hinreichend zuverlässigen prognostisch orientierten Simulationen bzw. Tragwerksanalysen angewendet werden kann.

Zur Demonstration der Vorteile der Anwendung des entwickelten Konzeptes bei dem Aufbau eines numerischen Instrumentariums wird hier zusätzlich das Ziel verfolgt, ein möglichst flexibles und zukünftig auch modifikationsfähiges Instrumentarium aufzubauen, welches dadurch langfristig genutzt werden kann und vor allem weiteraufgebaut werden kann, um zukünftige neue, im Rahmen der bisherigen Projekte nicht direkt vorgesehene Fragestellungen zu bearbeiten.

5 Ansätze zur physikalischen Modellierung

5.1 Homogenbereich Steinsalzgebirge

Der Homogenbereich Steinsalzgebirge wird einheitlich für z2-Steinsalz wie auch für z3-Steinsalz durch das Stoffmodell *Lux/Wolters* modelliert. Das Stoffmodell *Lux/Wolters* entsprechend *Lerche, S. (2012)*, *Wolters, R. (2014)* ist eine Weiterentwicklung des Stoffmodells *Hou/Lux*, das z.B. in *Hou, Z. (2002)* beschrieben wird.

Das Stoffmodell *Lux/Wolters* ist geeignet zur Modellierung von transienten und stationären Kriechprozessen sowie unter Berücksichtigung von Elementen der Continuum-Damage-Theorie auch zur Modellierung von bei Beanspruchungen oberhalb der Dilatanzgrenze des Steinsalzes auftretender Gefügeschädigung bzw. unterhalb der Verheilungsgrenze des Steinsalzes auftretender Rückbildung von Gefügeschädigungen, auch plakativ bezeichnet als Gefügeverheilung, der zugehörigen rückläufigen Dilatanzentwicklung und der damit einhergehenden schädigungs- bzw. verheilungsinduzierten Deformationen. *Bild 5.1* gibt eine schematische Darstellung zum prinzipiellen Aufbau des Stoffmodells *Lux/Wolters*.

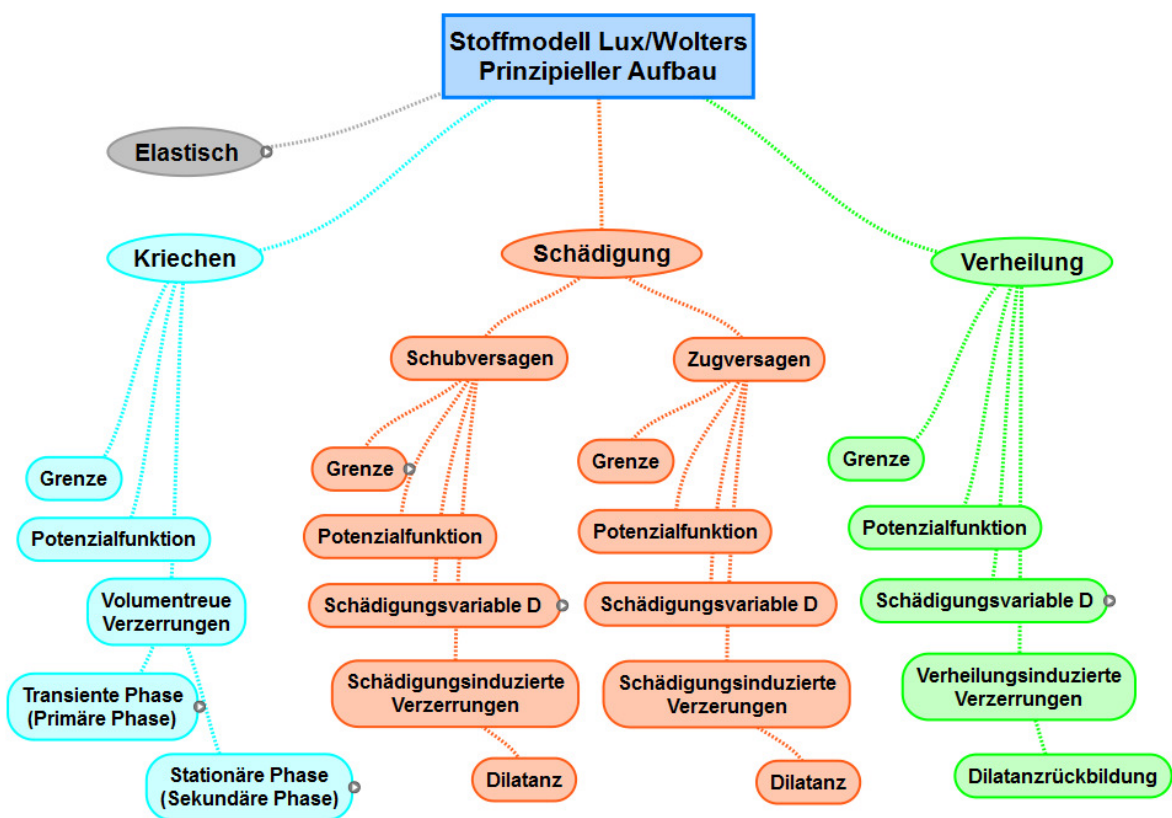


Bild 5.1: Schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus des Stoffmodells *Lux/Wolters*

Die Gesamtverzerrungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}$, die sich bei einem beliebigen Belastungszustand einstellt, wird im Stoffmodell *Lux/Wolters* entsprechend der *Boltzmannschen* Hypothese von der Additivität der Verzerrungsratenanteile durch eine additive Überlagerung der einzelnen Verzerrungsratenanteile beschrieben:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} + \dot{\epsilon}_{ij}^d + \dot{\epsilon}_{ij}^h \quad (5.1)$$

mit

$\dot{\epsilon}_{ij}^e$ - elastische Verzerrungsrate in d^{-1} ,

$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ - viskose Verzerrungsrate in d^{-1} ,

$\dot{\epsilon}_{ij}^d$ - schädigungsinduzierte Verzerrungsrate in d^{-1} und

$\dot{\epsilon}_{ij}^h$ - verheilungsinduzierte Verzerrungsrate in d^{-1} .

Für die einzelnen Verzerrungsratenanteile sind geeignete Teil-Stoffmodelle zu formulieren und darauf abgestimmte Materialkennwerte z.B. auf der Grundlage von laborativen Untersuchungen zu ermitteln. Im Einzelnen folgt für diese Teil-Stoffmodelle:

(a) *Elastische Verzerrungsrate* $\dot{\epsilon}_{ij}^e$

Die elastische Verzerrungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ wird durch das linear-elastische *Hookesche* Stoffmodell unter Berücksichtigung der Schädigung D beschrieben.

Die im Stoffmodell *Lux/Wolters* berechnete Schädigung D wirkt sich nach *Kachanov, L.M. (1986)* in einer Reduzierung der tragenden Querschnittsfläche und in der Folge in einer Erhöhung der Beanspruchung auf der noch intakten tragenden Querschnittsfläche aus. Darüber hinaus beeinflusst die Schädigung die Ausbildung der Dilatanz.

(b) *Viskose Verzerrungsrate* $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$

Im Stoffmodell *Lux/Wolters* dient das Teilstoffmodell *modLubby2* zur Beschreibung der viskosen Verzerrungen. Das Stoffmodell *modLubby2* ist die Weiterentwicklung des Stoffmodells *Lubby2*. Die Weiterentwicklung besteht dabei in der verbesserten Erfassung des Kriechverhaltens der Salzgesteine im Bereich niedriger Beanspruchungen, *Lerche (2012)*. Das Stoffmodell *Lubby2* basiert auf dem rheologischen Stoffmodell nach *Burgers*, das additiv überlagert transiente (nach *Kelvin*) und stationäre (nach *Maxwell*) Kriechdeformationen

beschreibt. Die auf das Kriechverhalten von Salzgestein angepasste Weiterentwicklung besteht in den nicht linear spannungs- und temperaturabhängig formulierten Viskositätsparametern im Vergleich zu den konstanten Viskositätsparametern im Stoffmodell nach *Burgers* (s. dazu *Heusermann, S., Lux, K.-H. & Rokahr, R. (1983)*).

Die Erhöhung des Beanspruchungszustandes aufgrund der Reduzierung der tragenden Querschnittsfläche durch die Schädigung des Materials wird im Stoffmodell *Lux/Wolters* auch bei der Beschreibung der transienten und stationären Kriechraten berücksichtigt.

(c) *Schädigungsinduzierte Verzerrungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}^d$*

Die bei Überschreitung der Dilatanzgrenze die Schädigung des Materials zusätzlich begleitenden Deformationen werden im Stoffmodell *Lux/Wolters* additiv zu den Kriechdeformationen beschrieben.

Die Schädigung bedingt bei der Rissbildung eine Volumenzunahme bzw. Dilatanz \mathcal{E}_{vol} . Die zeitliche Entwicklung der Dilatanz wird im Stoffmodell *Lux/Wolters* durch die Dilatanzrate $\dot{\mathcal{E}}_{vol}$ als Summe der drei schädigungsinduzierten Hauptverzerrungsraten beschrieben.

(d) *Verheilungsinduzierte Verzerrungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}^h$*

Die verheilungsinduzierte Verzerrungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}^h$ wird im Stoffmodell *Lux/Wolters* ebenfalls additiv beschrieben und tritt auf bei Unterschreitung einer vorgegebenen Verheilungsgrenze.

Der Dilatanzrückgang bei der Gefügeverheilung wird im Stoffmodell *Lux/Wolters* durch die Summe der Komponenten der Verheilungsverzerrungen beschrieben.

Die Dilatanzrückbildung bzw. die Verringerung der Rissvolumina wird von einer Rückbildung der Schädigung D begleitet.

Im Rahmen dieser Arbeit sind Berechnungsvariationen mit unterschiedlichen Materialkennwerten für das Stoffmodell *Lux/Wolters* durchgeführt worden. Bei allen durchgeführten Berechnungsvariationen sind allerdings die Materialkennwerte für das transiente Kriechen so eingestellt worden, dass der transiente Deformationsanteil nicht berücksichtigt wird, da er nur unmittelbar nach Belastungsumlagerungen (z. B. nach der Auffahrung eines Grubenbaus) wirksam wird und für eine längerfristige Simulation zum Tragverhalten des Grubengebäudes nur von untergeordneter Bedeutung ist. Des Weiteren wurden bei allen durchgeführten Berechnungsvariationen auch die Gefügeverheilung sowie der verheilungsinduzierte Deformationsanteil nicht explizit berücksichtigt.

Zu den verwendeten Materialkennwerten für den Homogenbereich Steinsalzgebirge sind folgende Aspekte hervorzuheben:

- Zur Beschreibung des linear-elastischen Materialverhaltens werden die vom IfG Leipzig verwendeten Kennwerte übernommen, *IfG Leipzig (2006b)*.
- Die Kennwerte zur Beschreibung des stationären Kriechverhaltens sind zunächst so abgeleitet worden, dass die im Stoffmodell *Lux/Wolters* verwendete Kriechcharakteristik relativ ähnlich ist zu der vom IfG Leipzig angesetzten Kriechcharakteristik, *IfG Leipzig (2006b)*. Da nach Vorliegen der Berechnungsbefunde allerdings die aus den numerischen Simulationen erhaltenen Sohlenhebungen für die Einlagerungskammern auf der 750-m-Sohle als deutlich zu groß eingeschätzt worden sind, sind die Kennwerte zur Beschreibung des stationären Kriechverhaltens angemessen modifiziert worden, *Lux, K.-H., Lerche, S., Dyogtyev, O., Wolters, R. (2012)*.
- Die Kennwerte zur Beschreibung des Schädigungs- und Dilatanzverhaltens sind auf der Grundlage vorhandener Daten eingeschätzt worden, *Lux, K.-H., Lerche, S., Dyogtyev, O., Wolters, R. (2012)*.

5.2 Homogenbereich Carnallititgebirge

Das Materialverhalten des Homogenbereichs Carnallititgebirge wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit analog zum Steinsalzgebirge durch das in Abschnitt 5.1 dargestellte Stoffmodell *Lux/Wolters* modelliert.

Zu den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Materialkennwerten für den Homogenbereich Carnallititgebirge sind folgende Aspekte hervorzuheben:

- Zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens werden die vom IfG Leipzig verwendeten Kennwerte übernommen, *IfG Leipzig (2006b)*.
- Die Materialkennwerte für das transiente Kriechen sind so eingestellt worden, dass der transiente Deformationsanteil nicht berücksichtigt wird.
- Zur Beschreibung des stationären Kriechverhaltens werden die vom IfG Leipzig verwendeten Kennwerte für $\bar{\eta}_m^*$ und m übernommen, *IfG Leipzig (2006b)*.

- Die Kennwerte zur Beschreibung des Schädigungs- und Dilatanzverhaltens sind für den Homogenbereich Carnallititgebirge mangels geeigneter Daten als identisch mit den entsprechenden Kennwerten des Homogenbereichs Steinsalzgebirge angesetzt worden.

5.3 Homogenbereich Deck- und Nebengebirge

Das Materialverhalten des nichtsalinaren Deckgebirges und des nichtsalinaren Nebengebirges wird mit einem bilinearen transversal-isotropen elasto-plastischen Stoffmodell modelliert, das bereits in der Software FLAC3D unter der Bezeichnung *Ubiquitous Joint (UJ)-Stoffmodell* implementiert ist, *Itasca (2009)*. Dieses Stoffmodell baut auf der Elasto-Plastizitätstheorie auf und ermöglicht zunächst anhand einer Fließ- bzw. Bruchgrenzbedingung die Identifizierung überbeanspruchter Bereiche im Gebirge und dann eine Umlagerung von Spannungen aus überbeanspruchten Gebirgsbereichen in benachbarte, weniger beanspruchte Gebirgsbereiche. Weiterhin können während der rechnerischen Simulation Gebirgsbereiche, in denen einer der nachfolgend näher erläuterten Ausnutzungsgrade den Zahlenwert $\eta = 1$ übersteigt, als geschädigt identifiziert, gekennzeichnet und für den weiteren Verlauf der Berechnung auch programmintern als geschädigt behandelt werden. Dazu wird bei der Durchführung einer Berechnung unter Verwendung des elastisch-plastischen Stoffmodells *Ubiquitous Joint* von FLAC3D zunächst die Gesteinsmatrix auf Zugversagen (Trennbruch) und danach auf Versagen aufgrund von Druck- / Schubspannungen (Scherbruch) überprüft. Anschließend erfolgt die Überprüfung der Schichtflächen im Hinblick auf ein Festigkeitsversagen.

Zwei Aspekte bei der physikalischen Modellierung sollen hier besonders hervorgehoben werden:

(1) *Ausnutzungsgrad und Anisotropie*

Die Matrixausnutzungsgrade η_M sowie die Schichtflächenausnutzungsgrade η_J kennzeichnen die Beanspruchungsintensität und beziehen sich auf die *Mohr-Coulombsche* Bruchbedingung.

Zur Berechnung des Ausnutzungsgrades des Gesteins in den Schichtflächen η_J werden die vorhandenen Koordinatenspannungen nach *Wittke, W. (1984)* in eine parallel zur Schichtungsebene verlaufende resultierende Schubspannung τ_{res} sowie eine senkrecht zur Schichtflächenebene wirkende Normalspannung σ_n transformiert. Der Ausnutzungsgrad des Gesteins in den Schichtflächen η_J wird anschließend wiederum nach *Mohr/Coulomb* berechnet.

Das Materialverhalten des Homogenbereichs Deck- und Nebengebirge wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als ein isotropes elasto-plastisches Material nach *Mohr-Coulomb* betrachtet bzw. je nach Variationsreihe bereichsweise auch mit anisotropen Eigenschaften entsprechend den Möglichkeiten des Stoffmodells *Ubiquitous Joint* versehen. In *Bild 5.2* ist der mit dem Stoffmodell *Ubiquitous Joint* modellierte Bereich des Nebengebirges mit gestrichelten Linien hervorgehoben. Es ist dabei zu erkennen, dass dieser Bereich in vertikaler Richtung in drei Zonen mit in unterschiedlichen Winkeln verlaufender Schichtungsrichtung entsprechend der Neigungsänderung der Steinsalz-Südflanke unterteilt wird. Das Materialverhalten des restlichen Homogenbereichs Deck- und Nebengebirge wird dabei weiterhin als ein isotropes elasto-plastisches Material nach *Mohr-Coulomb* betrachtet.

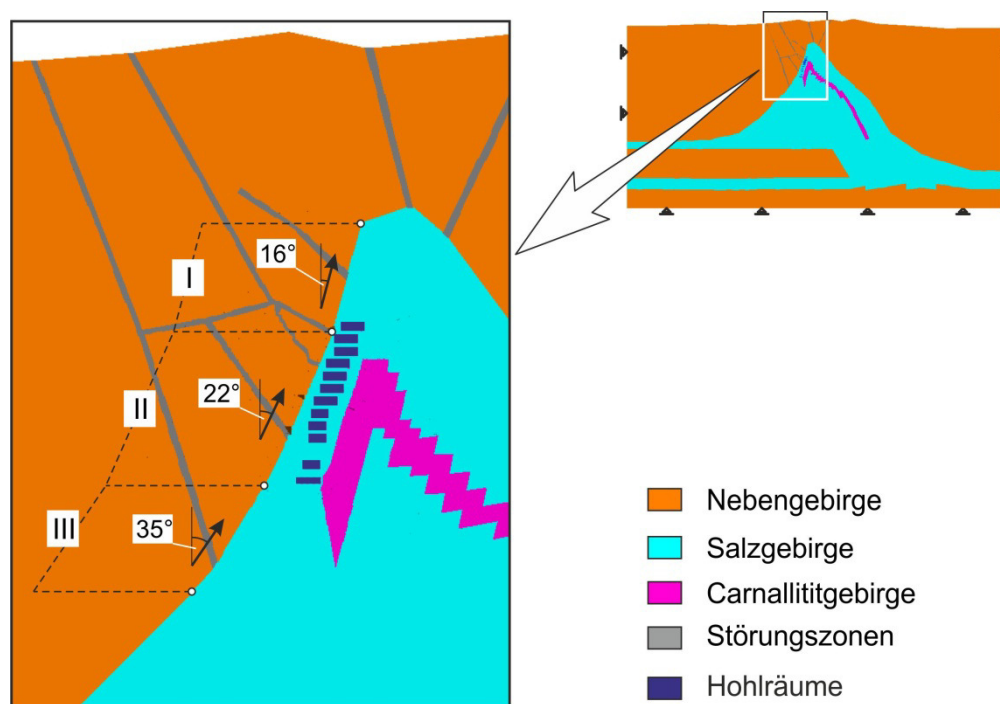


Bild 5.2: Berechnungsmodellbereich im Nebengebirge mit transversal-isotropen Eigenschaften

(2) Stoffmodellparameter

Grundlage der zahlenmäßigen Charakterisierung der Festigkeitseigenschaften des Deck- und Nebengebirges bildet das Kataster der gesteinsmechanischen Daten und Parameter für den Standort Asse, *IfG Leipzig (2006a)*. Im Rahmen von laborativen Untersuchungen sind an Gesteinsprüfkörpern des Buntsandsteins und des Muschelkalks die elastischen Kennwerte sowie die Festigkeitsparameter Kohäsion C und Winkel der inneren Reibung φ bestimmt worden. Die Festigkeitsparameter wurden mit Hilfe von Triaxialversuchen und direkten Scherversuchen

ermittelt. Die Gesteinskennwerte können allerdings nicht unmittelbar auf die jeweiligen Homogenbereiche des Gebirges übertragen werden, da hier noch das vorhandene Trennflächengefüge in seinen mechanischen Auswirkungen bezüglich Tragvermögen und Deformationseigenschaften zu berücksichtigen ist, das hinsichtlich seiner Ausbildung aber nicht bekannt ist.

Grundlage für die Abschätzung der Gebirgskennwerte ist daher eine Re-Analyse des Gebirgstragverhaltens. Die Abschätzung der Gebirgskennwerte erfolgt damit soweit möglich über die Ermittlung der bisherigen gebirgsmechanischen Reaktionen im Grubengebäude und den Vergleich mit Messdaten und Beobachtungen, d.h. auf Basis von Gesteinsuntersuchungen und In-situ-Beobachtungen. Da die in dem Kataster nach *Zhang (2000)* angegebenen Gesteinsfestigkeiten signifikant auf das Niveau von Gebirgsfestigkeiten reduziert werden müssen, wird angesichts der erforderlichen Einschätzungen eine Differenzierung zwischen verschiedenen Gebirgsschichten nicht mehr für begründbar gehalten, *IfG Leipzig (2006b)*.

5.4 Homogenbereich „Störungszonengebirge“

Das Materialverhalten des Homogenbereichs „Störungszonengebirge“ wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch das in Abschnitt 5.3 vorgestellte elastoplastische Stoffmodell mit der Festigkeitshypothese nach *Mohr/Coulomb* für ein isotropes Materialverhalten modelliert. Die Kennwerte für den Homogenbereich „Störungszonengebirge“ sind ursprünglich *IfG Leipzig (2006b)* entnommen und anschließend variiert worden. Dabei ist die Festigkeit im Bereich der Störungszonen durch stark abgeminderte Materialparameter im Vergleich mit dem Nebengebirge signifikant herabgesetzt.

5.5 Homogenbereich „Versatz“

Zur Beschreibung nichtlinear-elastischen Eigenschaften sowie der volumetrischen und der deviatorischen Kriecheigenschaften von Versatzmaterial und insbesondere von Salzgrus ist in FLAC3D das „Crushed-Salt Modell“ implementiert worden, *Itasca (2009)*. In diesem Versatzmodell ist die Dichte des Versatzmaterials ρ eine Funktion der volumetrischen Verzerrung \mathcal{E}_{vol} . Die Dichte ändert sich ausgehend von einer initialen Dichte ρ_0 bei Einbringung des Versatzes bis zu einer finalen Dichte ρ_f , die der Dichte von intaktem Steinsalz entspricht.

Bei der Formulierung und Implementierung des Stoffmodells wird angenommen, dass der Kompaktionsprozess nicht umkehrbar ist. Die Dichte kann sich somit einseitig nur erhöhen, nicht aber abnehmen.

Die Änderung der Versatzdichte wirkt sich ihrerseits auf die elastischen Kennwerte Kompressionsmodul K und Schubmodul G aus. Die Materialparameter K_1 und G_1 werden in der Art bestimmt, dass für den Fall $\rho = \rho_0$ die elastischen Kennwerte K und G ihre Anfangswerte für das unkomprimierte Versatzmaterial annehmen.

Die Verzerrungsrate $\dot{\mathcal{E}}_{ij}$ ergibt sich als additive Überlagerung der nichtlinear-elastischen Verzerrungsrate $\dot{\mathcal{E}}_{ij}^e$, der viskosen Kompaktionsverzerrungsrate $\dot{\mathcal{E}}_{ij}^c$ und der viskosen Schubverzerrungsrate $\dot{\mathcal{E}}_{ij}^s$:

$$\dot{\mathcal{E}}_{ij} = \dot{\mathcal{E}}_{ij}^e + \dot{\mathcal{E}}_{ij}^c + \dot{\mathcal{E}}_{ij}^s. \quad (5.2)$$

Die viskose Schubverzerrungsrate $\dot{\mathcal{E}}_{ij}^s$ entspricht dem in *Itasca (2009)* vorgestellten WIPP-Kriechmodell und setzt sich ihrerseits aus einem transienten und einem stationären Kriechanteil zusammen. Die Kompaktionsverzerrungsrate $\dot{\mathcal{E}}_{ij}^c$ wird basierend auf einem empirischen Kompaktionsratenmodell in Abhängigkeit von der Versatzdichte ermittelt.

6 Anwendung des entwickelten Konzeptes am Beispiel der Schachtanlage Asse II/Südflanke – Voranalyse und Etappe I

6.1 Voranalyse des realen Systems und Formulierung der Anforderungen an das idealisierte System

6.1.1 Analyse der geometrischen Daten (3D-Zeichnung)

Die Erstellung einer 3D-Zeichnung mit Digitalisierung vorhandener Informationen zur geotektonischen Situation und zur Geometrie des Grubengebäudes kann in folgende Etappen unterteilt werden:

- Erfassung und Digitalisierung der Konfiguration des Grubengebäudes mit insgesamt drei Baufeldern (Carnallititbaufeld an der Nordflanke, Steinsalzbaufeld im Satteln, Steinsalzbaufeld an der Südflanke),
- Erfassung und Digitalisierung der Geometrie der unmittelbar in der Nähe des Grubengebäudes verlaufenden Grenzflächen des Internbaus des Salinargebirges (Steinsalz- und Carnallititgebirge) – Nahbereich,
- Erfassung und Digitalisierung der Störungszonen im Nichtsalinargebirge,
- Erfassung und Digitalisierung des großräumigen Gebirgsbaus (relevante Gebirgsformationen in den Fernbereichen).

Die vorstehende Unterteilung ist erfolgt nach der Relevanz der jeweiligen zentralen Modellelemente für die weiteren numerischen Simulationen und der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Daten. Die Bandbreite reicht hier von der relativ gut belegten Konfiguration des Grubengebäudes bis zur nur teilweise belegten Geometrie der tiefliegenden Gebirgsschichten.

Der Aufbau des erweiterten geometrischen 3D-Modells erfolgte mit Hilfe des 3D-Zeichenprogramms AutoCAD 2013, *Autodesk (2012)*. Für die Erstellung dieses Modells wurden in einem ersten Schritt die charakteristischen geometrischen Punkte der verschiedenen geometrischen und geologischen Objekte aus vorhandenen Unterlagen (Schnitte und Teufenrisse) ermittelt und digital in eine 3D-Darstellung übertragen. Die charakteristischen geometrischen Punkte sind dann in einem zweiten Schritt digital zu Linien und teilweise zur besseren Darstellung zu Flächen zusammengefügt worden. Das erstellte geometrische Modell dient zunächst als Hilfe zur Visualisierung der 3D-Situation (Gebirgsbau, Geometrie) bei

Diskussionen und Entscheidungsfindungen und bildet dann weiterführend die zentrale Grundlage für den weiteren Aufbau des eigentlichen FD-Berechnungsmodells.

Erfassung und Digitalisierung der Geometrie des Grubengebäudes

Die möglichst genaue Übernahme der Kammergeometrien ist erforderlich, um damit indirekt auch eine zutreffende Integration der Abmessungen der verbliebenen salinaren Tragelemente in das Modell zu erreichen und so zunächst unter geometrischen Aspekten eine realitätsnahe Abbildung des Tragwerks und damit auch eine entsprechende Simulation des Tragverhaltens des Grubengebäudes zu gewährleisten.

Es ist weiterhin wichtig, bei dem Aufbau des Grubengebäudemodells auch seine zeitliche Entwicklung zu erfassen. Daraus folgt, dass in das 3D-Modell nicht nur der „ist“-Zustand des Grubengebäudes aufzunehmen ist, sondern auch die zeitliche Entwicklung. *Bild 6.1* zeigt eine der Grundlagen für die Digitalisierung des Baufeldes Südflanke. Aus dieser Darstellung sind nicht nur die Kammerauffahrungszeiten, sondern auch die Kammerhöhen abgeleitet worden.

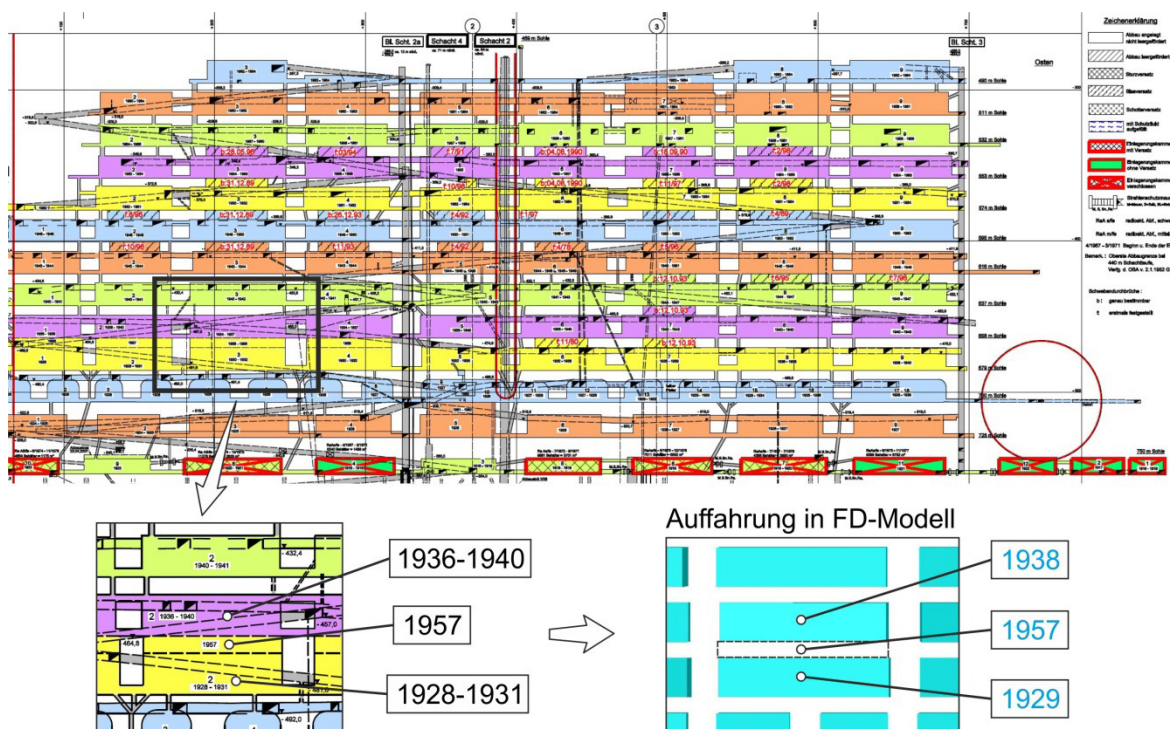


Bild 6.1: Schnitt 1 mit Sonderdarstellung der Kammerauffahrungszeiten im realen System (Wallmüller (2012)) und in den numerischen Simulationen

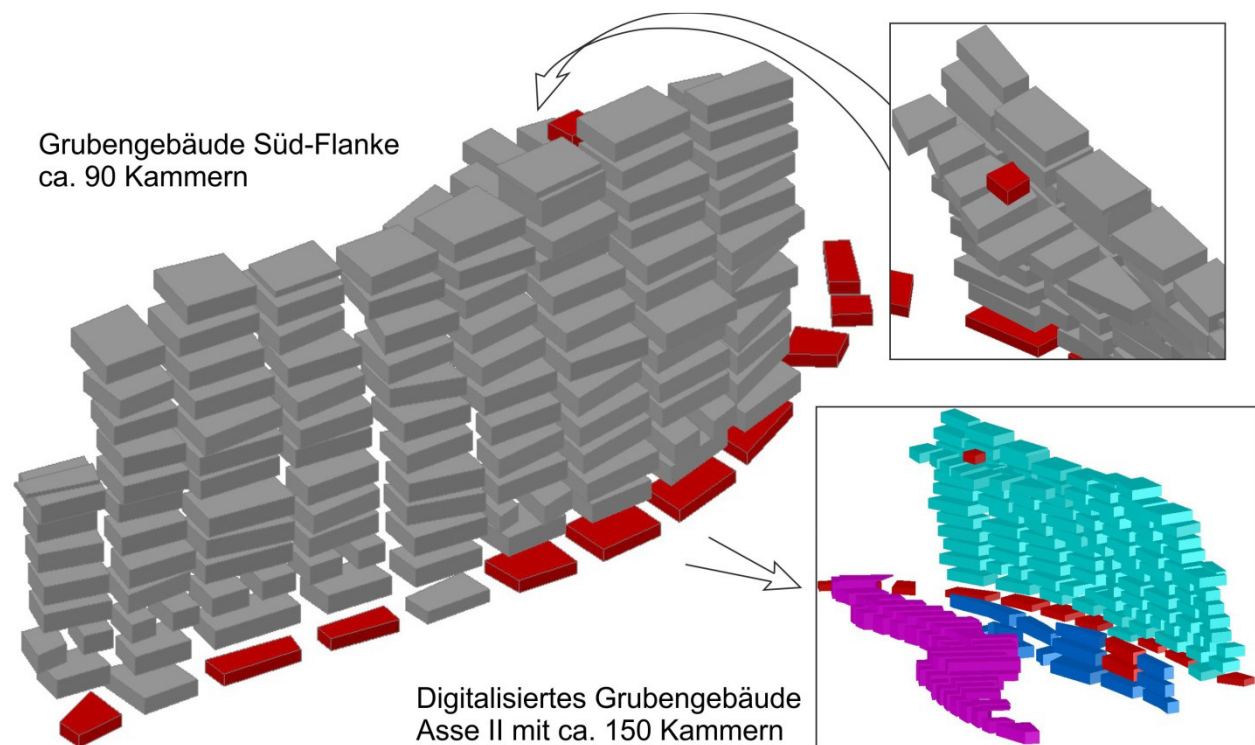


Bild 6.2: 3D-Darstellung des digitalisierten Grubengebäudes der Schachthanlage Asse II mit den drei Baufeldern

Das Ergebnis der 3D-Digitalisierung der drei Baufelder ist in *Bild 6.2* dargestellt. Insgesamt sind etwa 150 Kammern des Grubengebäudes Asse II in das digitale 3D-Modell implementiert worden. Die einzelnen Baufelder sind farblich unterschiedlich markiert entsprechend auch dem jeweiligen Homogenbereich (mit Baufeld Südflanke-hellblau (z3), Baufeld Sattelkern-dunkelblau (z2) und Baufeld Carnallit-magenta (K2 bzw. z2SF)). Dabei wurde das Baufeld Südflanke mit insgesamt ca. 90 Kammern einschließlich zusätzlicher 8 Abbaukammern in zweiter Reihe auf der 532-m- und der 511-m-Sohle in ihrer Lage und Geometrie möglichst genau abgebildet. In diesen zusätzlich auf der 511-m-Sohle in das 3D-Modell integrierten Abbaukammern sind teilweise auch Abfälle abgelagert. Die mit abgelagerten Abfällen belegten Abbaukammern sind in *Bild 6.2* in rot markiert. Dabei handelt es sich insgesamt um 11 Kammern mit gering aktiven Abfällen (LAW) und eine Kammer auf der 511-m-Sohle mit mittelaktiven Abfällen (MAW).

Erfassung und Digitalisierung der Geometrie der Steinsalzanbaubank/Salzbarriere sowie des Internbaus des Salzsattels

Der nächste Schritt in der Digitalisierung war die 3D-Modellierung von salinarinternen Begrenzungsflächen in der Nähe des Grubengebäudes (fazieswechselbedingte Homogenbereichsberandungen).

Das Steinsalzbaufeld an der Südflanke wurde in unmittelbarer Nähe zum südlichen nichtsalinaren Deck- und Nebengebirge aufgefahren. Auf den oberen Sohlen besitzt die Steinsalzanbaubank/Steinsalzbarriere zum Deck- und Nebengebirge nur minimale Mächtigkeiten von weniger als 10 m.

Exemplarisch sind die Ergebnisse der 3D-Digitalisierung der verschiedenen Salzfaziesgrenzen in *Bild 6.3* dargestellt: (a) für die 553-m-Sohle der Südflanke, (b) für das gesamte geologische System in der Umgebung der Südflanke in Form von Isolinien und (c) für das gesamte geologische System in der Umgebung der Südflanke in flächenhafter Form. Hauptsächlich Grundlage für die Digitalisierung der Homogenbereiche sind die geologischen Grundrisse nach *Wallmüller (2012)*.

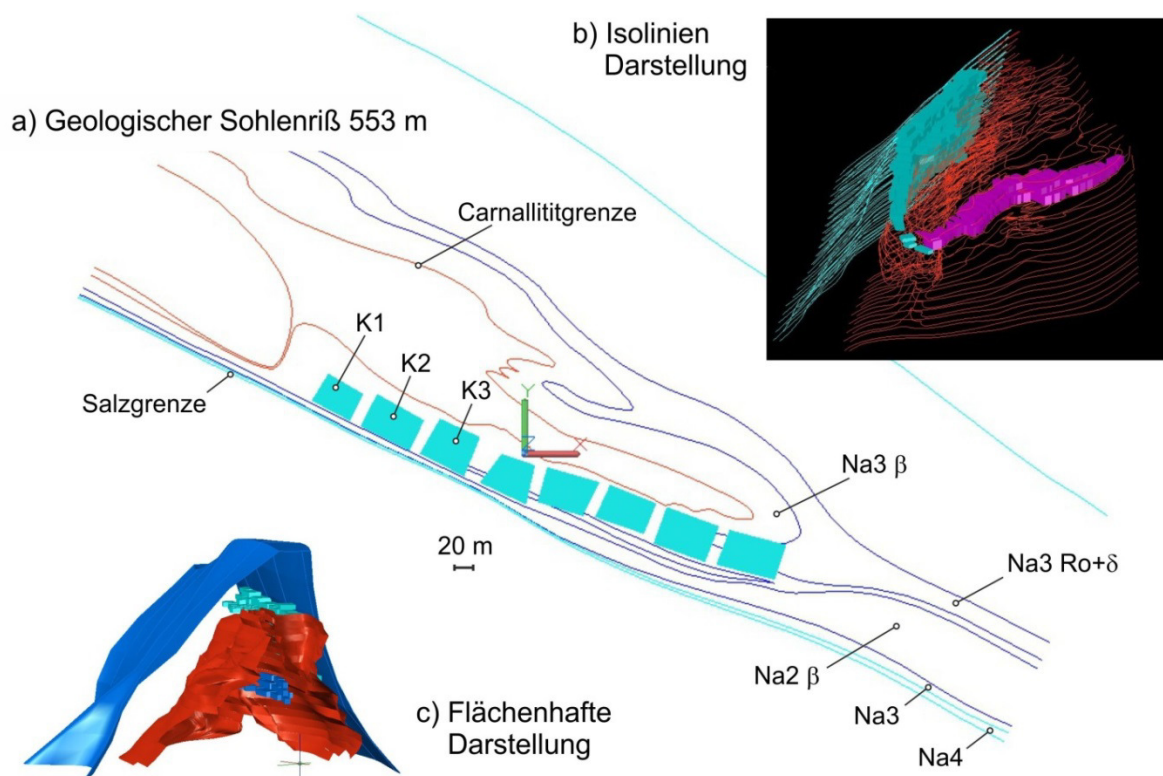


Bild 6.3: 3D-Digitalisierung der verschiedenen Salzfaziesgrenzen (mit Isolinien- und 3D-Flächendarstellungen), nach den geologischen Grundrissen von Wallmüller (2012)

Erfassung und Digitalisierung des nichtsalinaren Deck- und Nebengebirges, insbesondere des Störungs- und Kluftsystems

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass über die Ausbildung von Gesteinsmatrix und Kluftgefüge hinaus die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften sowie die Geometrie der Störungszonen im Deck- und Nebengebirge eine wesentliche Bedeutung bei der Simulation des gebirgsmechanischen Tragverhaltens der Süd-Flanke haben, *IfG Leipzig (2006a)*, *Lux, K.-H., Roussev, P., Dyogtyev, O., Wolters, R. (2011)*. Die entsprechenden Ergebnisse werden in Kapitel 6.2 ausführlicher erläutert. Als Hauptgrundlage für den Aufbau und die geometrische Positionierung des Störungszonensystems sind die geologischen Grundrisse nach *Wallmüller (2012)* herangezogen worden. Leider sind die im Risswerk aufgeführten Störungszonen auch unmittelbar in der Nähe des Grubengebäudes nicht durch Erkundungsbohrungen nachgewiesen worden. Die Störungszonen werden daher am Standort Schachtanlage Asse II in Anlehnung an *Wallmüller (2012)* grundsätzlich in drei Klassen unterteilt: nachgewiesen, wahrscheinlich und vermutet, *Bild 6.4a*. Um die Möglichkeit zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse im Hinblick auf die Relevanz einzelner Störungszonen bereitzustellen, ist entschieden worden, alle dokumentierten Störungszonen süd-westlich der Süd-Flanke unabhängig von der Wahrscheinlichkeit ihrer Existenz zunächst geometrisch digital zu erfassen, um sie in späteren FD-Modellen je nach Bedarf berücksichtigen zu können. Die Positionen der Störungszonen können entsprechend *Bild 6.4b* in Vertikalschnitten und entsprechend *Bild 6.4c* in Horizontalschnitten abgebildet werden.

Möglich ist es auch, die in das 3D-Modell integrierten Störungszonen in ihrer räumlichen Lage darzustellen. Dazu sind die Längsstörungen in *Bild 6.5a* und die Querstörungen zusammen mit den Diagonalstörungen in *Bild 6.5b* dargestellt. Aus *Bild 6.5c* ist die Projektion der Störungszonen auf die Steinsalzoberfläche zu ersehen. Mit dieser Darstellung wird deutlich, dass die anfängliche Annahme eines symmetrischen Referenzmodells in Abbaufeldmitte (s. 36m-Streifenmodell in Kapitel 6.2.2.1) nur sehr begrenzt die reale großräumige Zerblockung des Deck- und Nebengebirges erfassen kann.

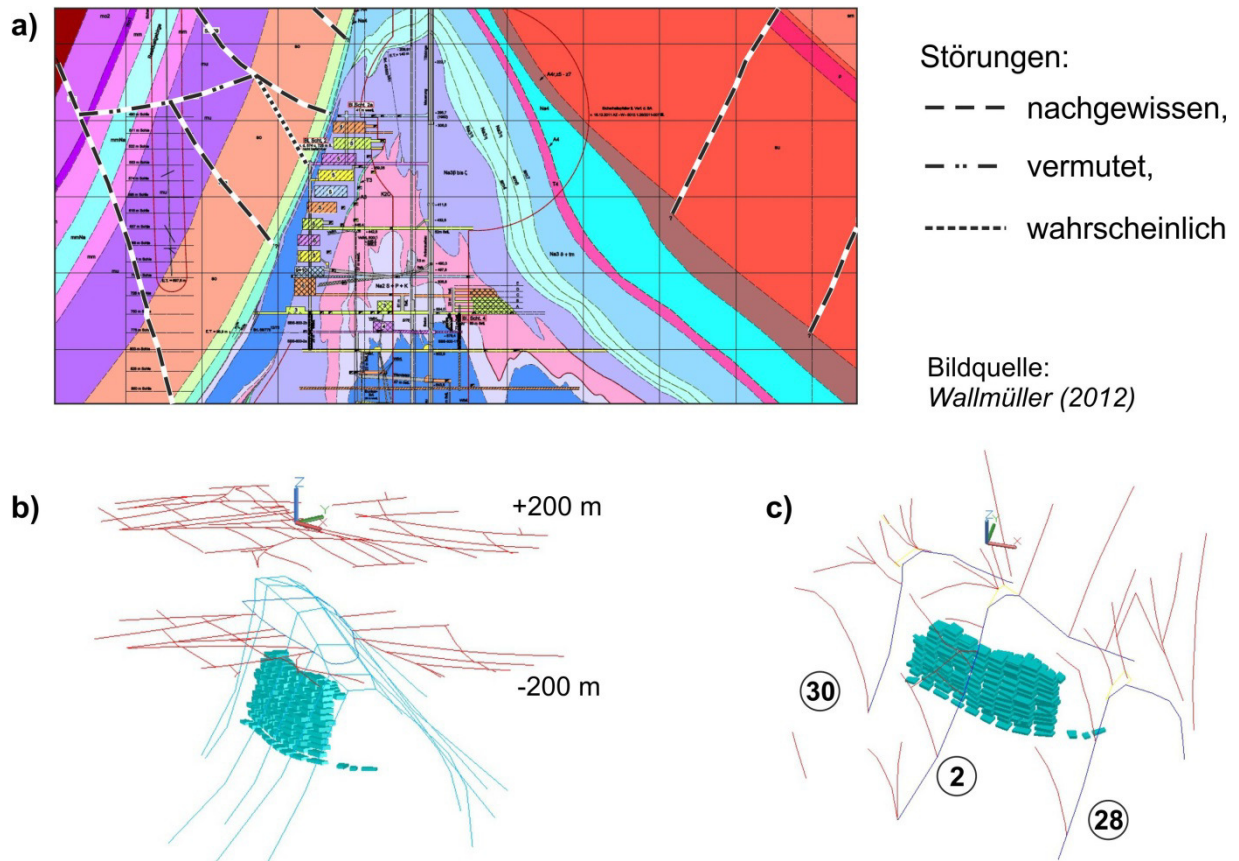


Bild 6.4: Störungszonen im Vertikalschnitt 2 (a) und Projektion der Störungszonen im 3D-Digitalmodell auf Vertikalschnitte (b) und Horizontalschnitte (c)

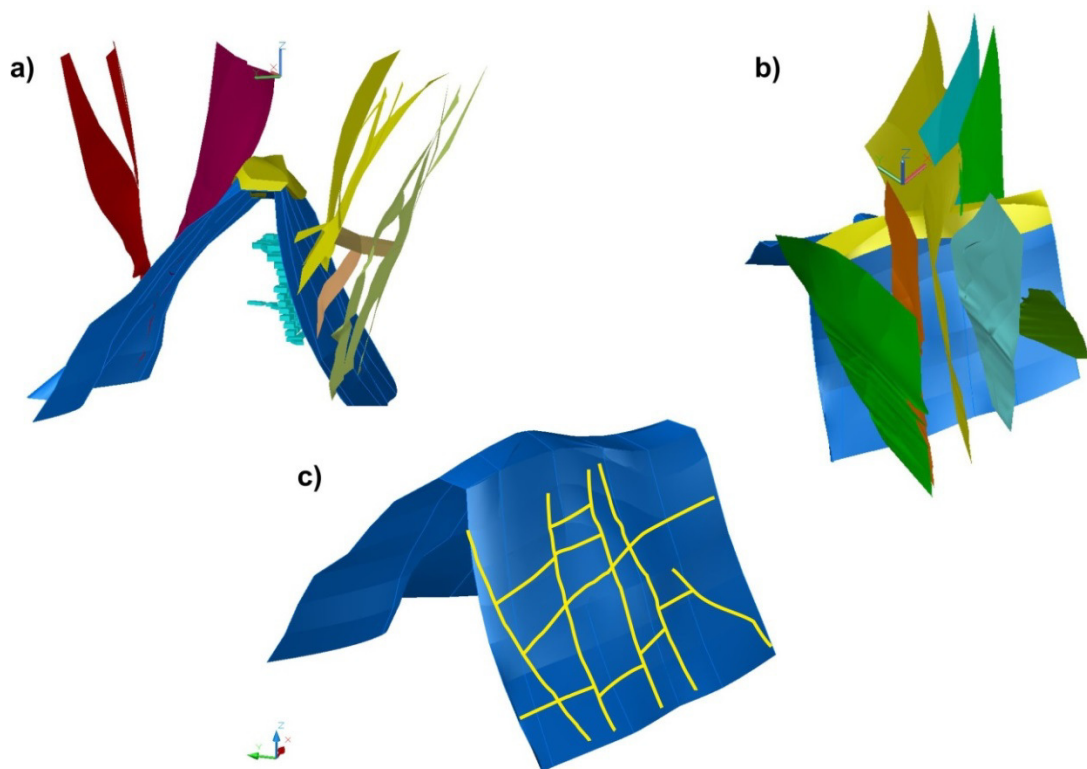


Bild 6.5: Flächenhafte Darstellung der Störungszonen im Nebengebirge

Unter der Annahme, dass fernliegende Störungszonen keinen Einfluss auf das Tragverhalten des Grubengebäudes haben, wohl aber diejenigen im Nahbereich der Südflanke, sind alle relevanten Störungszonen in der Nähe der Südflanke in das Digitalmodell abgebildet worden. Für die oberhalb des Grubengebäudes liegenden Störungszonen (sehr stark geklüfteter Gebirgsbereich oberhalb -200m / verstürztes Gebirge) erscheint wegen der Größe des späteren FD-Simulationsmodells eine individuelle Abbildung nicht möglich. Erste Untersuchungen zeigen allerdings, dass dieses verstürzte Gebirge einen deutlichen Einfluss auf die Simulation der Oberflächenabsenkungen hat. Daher wurde entschieden, diesen Gebirgsbereich als speziellen Homogenbereich mit gegenüber den Gesteinseigenschaften aufgrund des intensiv ausgebildeten Trennflächengefüges deutlich abgeminderten Steifigkeits- und Bruchfestigkeitseigenschaften in den späteren Berechnungen zu berücksichtigen.

Erfassung und Digitalisierung des großräumigen Gebirgsbaus

Die bisherigen numerischen Berechnungen des *IfG Leipzig (2006a)* haben gezeigt, dass es für die rechnerische Ableitung des Primärspannungszustandes erforderlich ist, die geotektonische Struktur auch des fern- und tiefliegenden Gebirges im Simulationsmodell zu berücksichtigen. Die geotektonische Struktur basiert auf einer erweiterten geologischen Darstellung im Schnitt 2, *Colenco (2006b)*. Leider stellen andere vorhandene geologische Schnitte die Struktur nur bis in eine Teufe von ca. 1000 m dar. In *Bild 6.6* ist die Lage der Vertikalschnitte im geologischen Kartenwerk dargestellt.

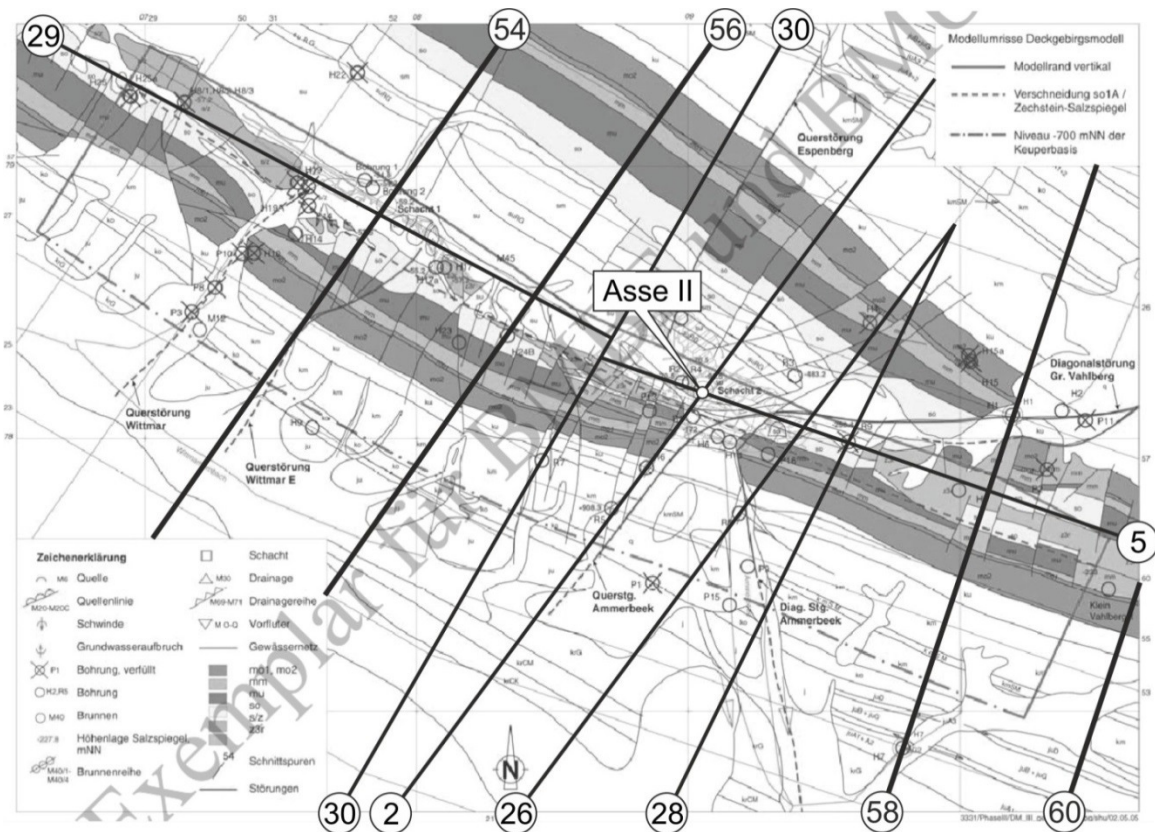


Bild 6.6: Geologische Karte mit der Lage der Vertikalschnitte nach Colenco (2006b)

Als zentrale Grundlage für den Aufbau des Gebirgsmodells im Liegenden sind die geologischen Vertikalschnitte aus Colenco (2006a) herangezogen worden. Bild 6.7 zeigt die Lage der Vertikalschnitte in einer räumlichen Darstellung des 3D-Digitalmodells. Hervorgehoben ist das Vertikalprofil 2 mit seiner Erstreckung bis zur Salzbasis in ca. 2200 m Teufe.

Die durch Digitalisierung vorhandener Informationen zur Geometrie der Schachthanlage Asse II und zur geotektonischen Situation ihrer Umgebung erstellte 3D-Zeichnung entsprechend Bild 6.8 dient zunächst zur Visualisierung der komplexen 3D-Situation am Standort und als Entscheidungshilfe für die weitere Abstraktion und bildet dann die zentrale Grundlage für die unmittelbar anschließenden nachfolgenden Schritte zum Aufbau eines lateral erweiterten geometrischen 3D-Modells.

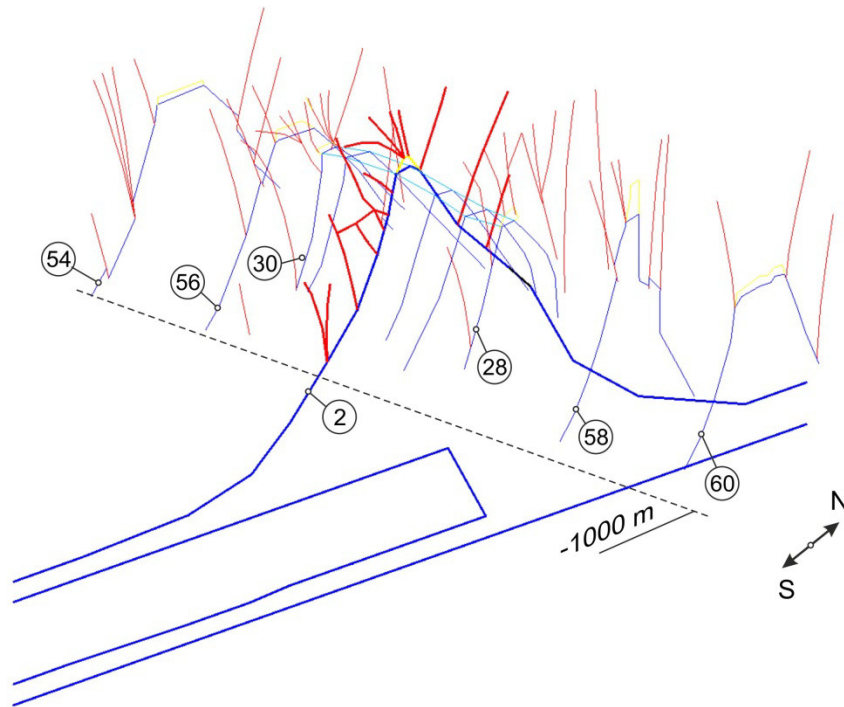


Bild 6.7: Darstellung der Vertikalschnitte im 3D-Digitalmodell nach Colenco (2006a)

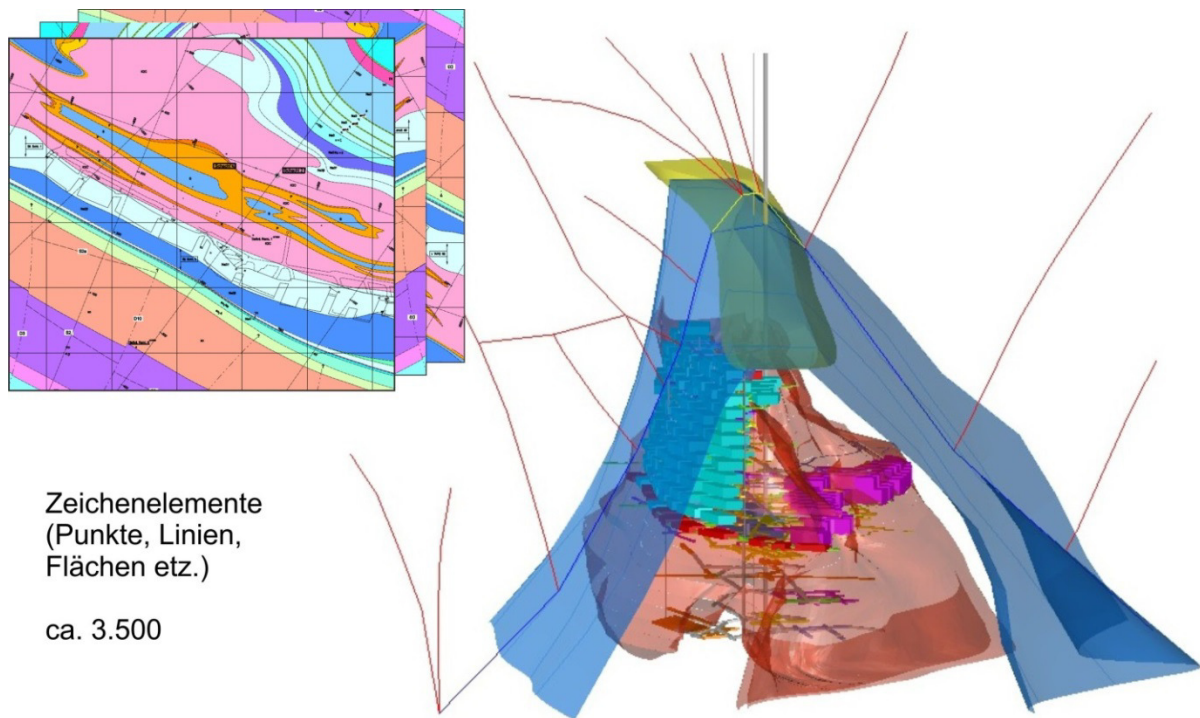


Bild 6.8: 3D-Zeichnung zum geotektonischen Aufbau des Gebirges sowie zur geometrischen Ausbildung des untertägigen Hohlraumsystems

6.1.2 Übersicht der zur Verfügung stehenden In-situ-Messwerte

Für den Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulationen mit den In-situ-Messwerten standen für das ausgewählte Untersuchungsobjekt Schachtanlage Asse II umfangreiche Messdaten zur Verfügung, die nachstehend zusammen mit den jeweiligen Messberichten aufgeführt sind:

- Messungen in Bezug auf Gebirgsbewegungen
 - Pfeilerstauchungsmessungen, *ASSE-GmbH (2014a)*
 - Inklinometermessungen, *ASSE-GmbH (2014b)*
 - Verschiebungsmessungen der Festpunkte, *ASSE-GmbH (2011a)*
 - Oberflächenabsenkungsmessungen, *ASSE-GmbH (2011b)*
 - Volumenänderungen der Einlagerungskammern (Konvergenz), *GSF (2007)*
 - Höhenänderungsmessungen, *ASSE-GmbH (2011a)*
 - Fissurometermessungen, *ASSE-GmbH (2011a)*
- Messungen in Bezug auf Spannungen/Gebirgsbeanspruchungen
 - Gebirgsspannungsmessungen im Tragsystem, *BfS (2008a)* und *ASSE-GmbH (2011a)*
 - Versatzdruckmessungen, *BfS (2008b)*,
- Messungen sonstiger Art
 - Mikroseismische Überwachungen, *ASSE-GmbH (2011a)*
 - Temperatur- und Feuchtemessungen, *ASSE-GmbH (2011a)*
 - Lösungszutrittsmessungen, *ASSE-GmbH (2011a)*

In *Bild 6.9* sind die entsprechenden Positionen von Messsystemen im Bereich der Südflanke dargestellt.

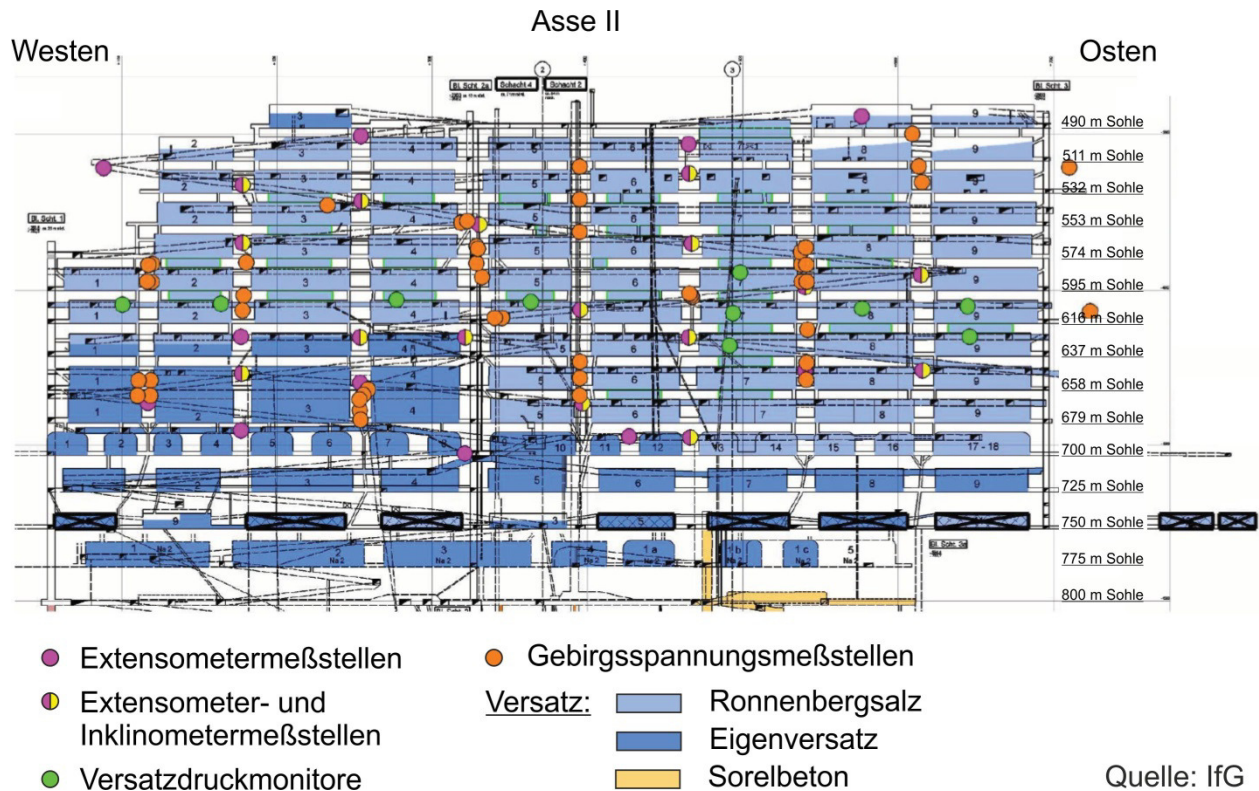


Bild 6.9: Positionen der In-situ-Messsysteme, IfG Leipzig (2009)

Für den Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulationen für die gesamte Asse II/Südflanke mit den In-situ-Messwerten sind folgende Informationen als wegweisend geeignet eingeschätzt worden:

- Messungen in Bezug auf Gebirgsbewegungen:
 - Pfeilerstauchungsmessungen,
 - Inklinometermessungen,
 - Verschiebungsmessungen der Festpunkte,
 - Oberflächenabsenkungsmessungen,
 - Volumenänderungen der Einlagerungskammern (Konvergenz);
- Messungen in Bezug auf Spannungen/Gebirgsbeanspruchungen:
 - Gebirgsspannungsmessungen im Tragsystem,
 - Versatzdruckmessungen.

Diese unterschiedlichen Messsysteme haben mitunter zu unterschiedlichen Zeitabschnitten Messdaten geliefert. In Bild 6.10 sind schematisch die Zeitabschnitte für die vorhandenen Messdaten in Relation zur geschichtlichen Entwicklung des Grubengebäudes dargestellt.

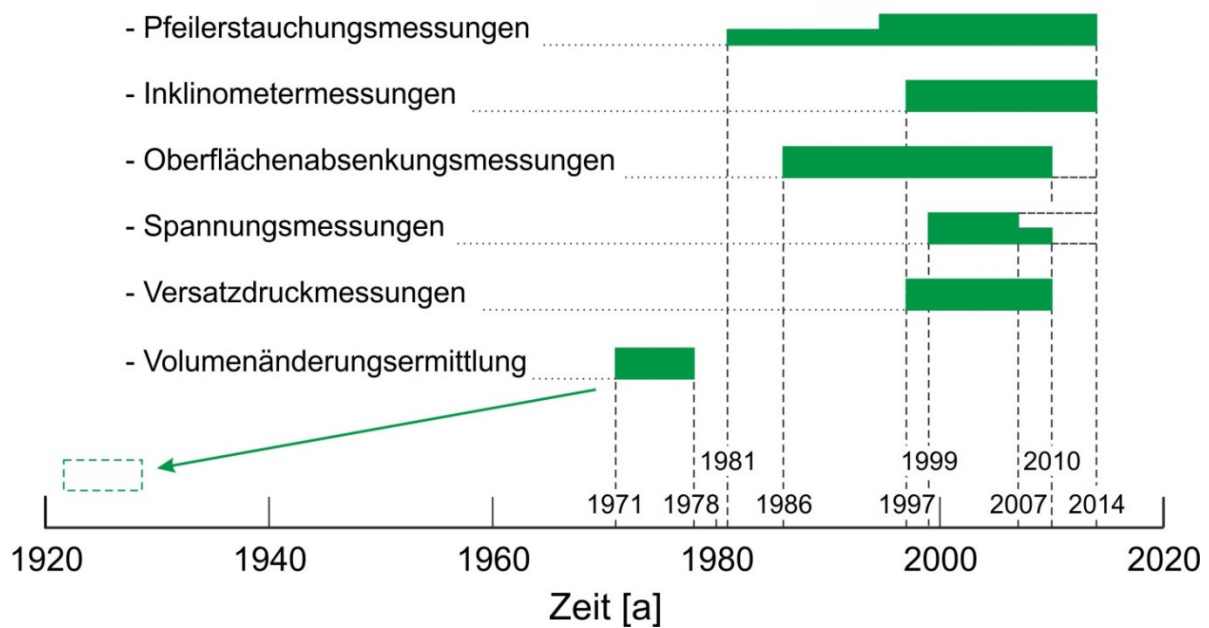


Bild 6.10: Schematische Übersicht der zur Verfügung stehenden In-situ-Messwerte

6.1.3 Analyse der Ungewissheiten/Imponderabilien

Nach der Analyse der geometrischen Informationen sowie weiterer In-situ-Messdaten, zu der geschichtlichen Entwicklung und zu dem Verformungs- und Beanspruchungszustand der Schachtanlage Asse II lassen sich folgende festgestellte lokationsbezogen relevante, den numerischen Validierungsaufwand wesentlich beeinflussende Ungewissheiten/Imponderabilien nennen:

Geometrie des zu modellierenden Systems

- Störungszonen → Existenz(!), Lage, Verlauf und tatsächliche Breite, *Bild 6.4*;
- Fernbereich → die Struktur im Liegenden unterhalb von 1000 m ist wenig belegt, da dazu nur wenige Tiefbohrungen zur Verfügung stehen, *Wallmüller (2012)* sowie *Bild 6.7*.

Lokationsspezifisches Materialverhalten

- Materialeigenschaften der Störungszonen;
- Struktur und Materialeigenschaften des Nebengebirges in der Nähe der Südflanke sowie des Hangenden oberhalb des Grubengebäudes;
- Befeuchtungs- sowie Schädigungszustand der Anbaubank;
- Struktur und Materialeigenschaften des Deckgebirges oberhalb des Salzsattels.

6.1.4 Feststellung des Schwierigkeitsgrades und damit der Komplexität des zu erstellenden numerischen Modells

Der Schwierigkeitsgrad und damit die Komplexität des zu erstellenden numerischen Modells ist bedingt vor allem durch:

- die Komplexität des geometrischen Aufbaus des realen Systems;
- die Komplexität des Systemverhaltens (relevante Prozesse, Wechselwirkungen);
- den angestrebten Grad der Realitätsnähe (im Rahmen der formulierten Ziele).

Nachstehend werden diese die Modellierungstiefe bestimmenden Faktoren in Bezug auf das Untersuchungsobjekt Asse II/Südflanke konkretisiert und analysiert.

Zur Komplexität des geometrischen Aufbaus des realen Systems

- Das Kammersystem hat eine grundsätzlich reguläre Struktur mit einem regelmäßigen Pfeiler- und Schweben-Raster mit einer leichten Krümmung in West-Ost-Richtung, so dass eine Symmetrieannahme entlang des Grubengebäudes im Grundsatz zulässig ist.
- Der 20-m-Zentralpfeiler teilt jedoch das gesamte Grubengebäude in zwei ungleiche Hälften mit 4 bzw. 5 Kammerreihen.
- Einige zusätzliche Kammern auf der 750-m-Sohle sowie auf der 511-m-Sohle und 532-m-Sohle bringen lokal eine zusätzliche Asymmetrie in das Kammer-Pfeiler-System.
- Vermutlich ist auch die Befeuchtung einiger Bereiche im Tragsystem ausgeprägt unsymmetrisch.
- Die Dicke der Steinsalz-Anbaubank bleibt nicht gleich entlang des Grubengebäudes und nimmt auch deutlich mit der Teufe zu.
- Der Carnallitit Aufbau ist räumlich komplex ausgeprägt und nicht symmetrisch strukturiert.
- Das Nebengebirge in der Nähe des Grubengebäudes ist stark und wenig systematisch geklüftet.

Zur Komplexität des Systemverhaltens

- Die Kammern des Grubengebäudes sind mit zwei verschiedenen Versatzarten mit einer vermutlich unterschiedlichen Stabilisierungswirkung in einer ausgeprägt nicht symmetrischen Verteilung verfüllt, *Bild 4.6*.
- Die räumliche Verteilung der Schwebenbrüche zeugt für eine ausgeprägte Asymmetrie in der Entwicklung einer starken Entfestigung im Tragsystem, *Bild 4.6*.

Zum angestrebten Grad der Realitätsnähe

Nachfolgend werden prinzipiell vorstellbare Möglichkeiten zur Abbildung des realen Systems kurz geschildert, *Bild 6.11*:

- Die Modellierung eines stark idealisierten 2D-Schnittes in vertikaler Richtung (2D-Modell) bietet als eine eher grobe Annäherung bei der Abbildung des gesamten Systems die Möglichkeit, eher sehr grundsätzliche Zusammenhänge qualitativ abzubilden, ist jedoch als wenig repräsentativ für das Tragsystem anzusehen, da prinzipiell nur Schweben als Tragsystemteile, nicht aber die Pfeiler abgebildet werden können.
- Die Modellierung eines vertikalen Streifens (Q-3D-Modell) mit einer für das Tragsystem repräsentativen Abbildung jeweils eines halben Pfeilers und einer halben Kammer mit der Symmetrie-Annahme in lateraler Richtung bietet im Vergleich zum 2D-Modell die Möglichkeit, die Wechselwirkung zwischen dem großräumigen System und der filigranen Struktur qualitativ und bezogen auf lokale Bereiche sogar quantitativ realitätsnah abzubilden. Noch nicht erfasst wird der Einfluss der Störungszonen des Nebengebirges auf das Tragverhalten.
- Die Modellierung des gesamten Tragsystems (bzw. der Hälfte des Tragsystems) mit dem Aufbau eines komplexen, im Vergleich zum Streifenmodell lateral wesentlich erweiterten 3D-Gesamtmodells bietet die Möglichkeit, auf die vereinfachenden Symmetrieannahmen zu verzichten und dadurch die Realitätsnähe erheblich und auf das angestrebte Niveau zu erhöhen. Insbesondere können die Störungszonen in belegter bzw. vermuteter Position in das Modell integriert werden.

Im Rahmen der hier formulierten Ziele für das ausgewählte Untersuchungsobjekt entsprechend Kapitel 4 wird die letzte Variante mit der Modellierung des gesamten Systems als zielführend angesehen und angestrebt. In diesem Fall wird der Komplexitätsgrad des zu erstellenden Modells auf Klasse 4 bis 5 entsprechend der in Kapitel 3.1 vorgeschlagenen Klassifizierung im Voraus eingeschätzt.

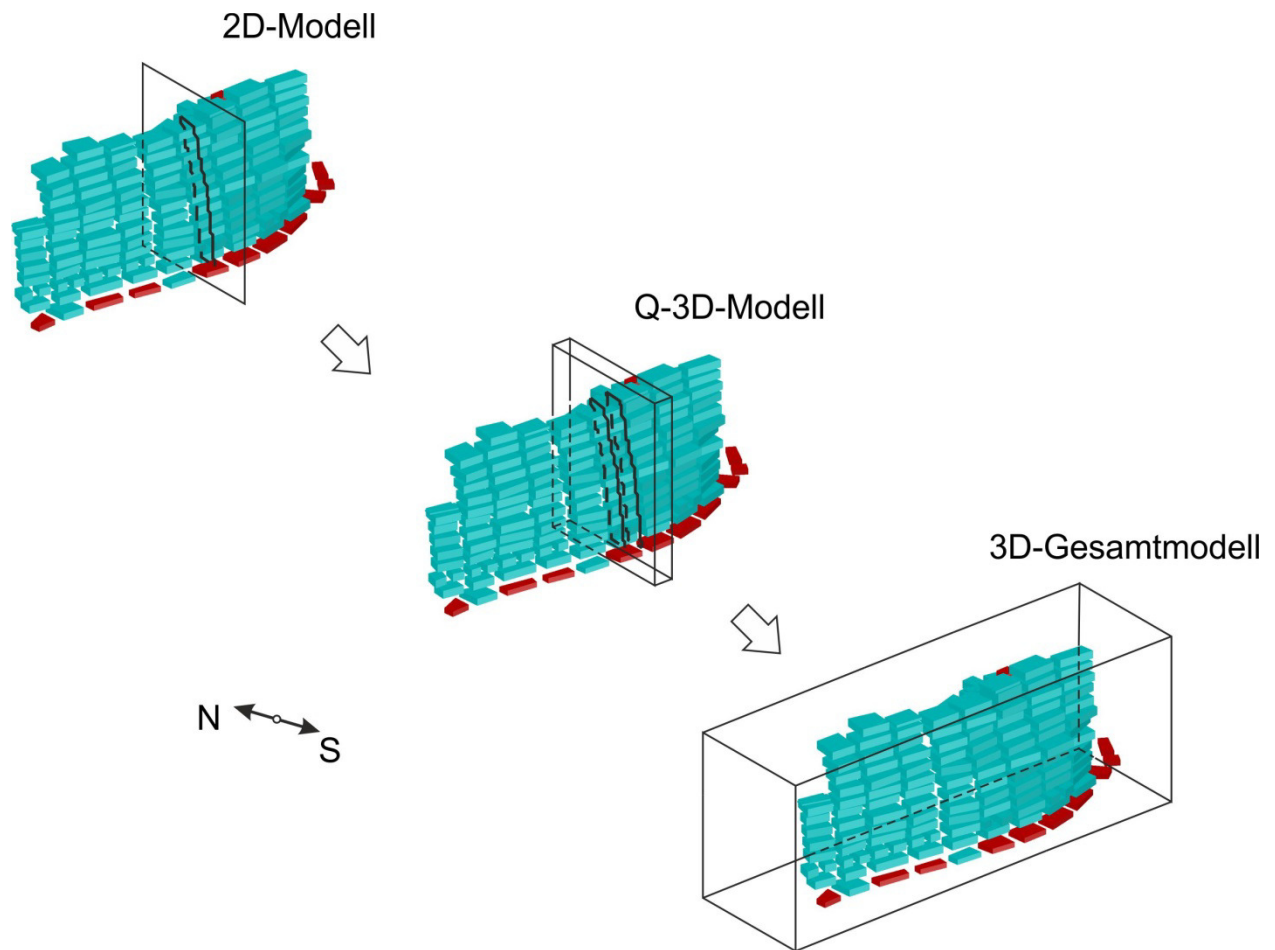


Bild 6.11: Prinzipielle Abstraktionsmöglichkeiten bei der Abbildung des Asse II/Südflanke-Systems im Hinblick auf den Aufbau eines numerischen Modells

6.2 Etappe I: Aufbau eines grundlegenden Verständnisses zum Systemverhalten

6.2.1 Beherrschung einzelner Prozesse

6.2.1.1 Abbildung des Entfestigungsprozesses im Tragsystem

Im Rahmen der Realisierung der Etappe I des Konzeptes sind im ersten Schritt vorbereitende Arbeiten zur Erarbeitung erster grundlegender Erkenntnisse zum Verhalten einzelner Systembestandteile anhand von Funktionsmodellen durchgeführt worden.

Aus der Analyse der geschichtlichen Entwicklung und der In-situ-Messwerte zum Untersuchungsobjekt Asse II/Südflanke wurde deutlich, dass der Prozess der starken Entfestigung im Tragsystem in Form von Pfeilerentfestigungen und Schwebenbrüchen zu einem der wesentlichen abzubildenden Prozesse gehört.

Zur Untersuchung dieses einzelnen Prozesses wurde ein dafür geeignetes Funktionsmodell FM-1 entwickelt. Mit dem Funktionsmodell FM-1 wird ein für das Tragverhalten des Gesamtsystems charakteristisches Teil-Tragelement definiert, das eine Schweben sowie die beiden benachbarten Kammern oberhalb bzw. unterhalb dieser Schweben mit den angrenzenden Pfeilern modelliert, wobei aus Symmetriegründen die beiden benachbarten Kammern jeweils nur als Viertelkammer und die beiden Pfeiler jeweils nur als Viertelpfeiler in das Modell integriert werden. *Bild 6.12* zeigt die geometrischen Abmessungen des Funktionsmodells FM-1.

Die rechte Berandungsfläche ist normal zu ihrer Oberfläche unverschieblich gelagert. Aufgrund der Symmetriebedingungen sind auch die obere, die untere, die vordere und die hintere Berandungsfläche normal zu ihren jeweiligen Oberflächen unverschieblich gelagert. Auf die linke Berandungsfläche wirkt eine Normalspannung, die dem in das Modell eingprägten Primärspannungsniveau entspricht. Der Ausgangsspannungszustand in diesem Modell unterstellt eine primäre Vertikalspannung von $\sigma_z = 13 \text{ MPa}$, eine normal zum Salzsattel gerichtete primäre Horizontalspannung von $\sigma_x = 13 \text{ MPa}$ sowie eine streichend zum Salzsattel gerichtete primäre

Horizontalspannung von $\sigma_y = 13 \text{ MPa}$ im Steinsalz und von $\sigma_y = \frac{0,32}{1-0,32} \cdot \sigma_z \approx 6,1 \text{ MPa}$ im Nebengebirge.

Anhand des Funktionsmodells FM-1 ist vor allem das Schwebenbruchverhalten untersucht worden, insbesondere mit Blick auf die Ausbildung der in situ beobachteten Restschwebenringe. Aus diesem Grund ist die Diskretisierung des Modells im Bereich der Schweben und im Nahfeld der Kammern relativ fein. Die FLAC3D-Zonen haben dort eine charakteristische Größe von 1m.

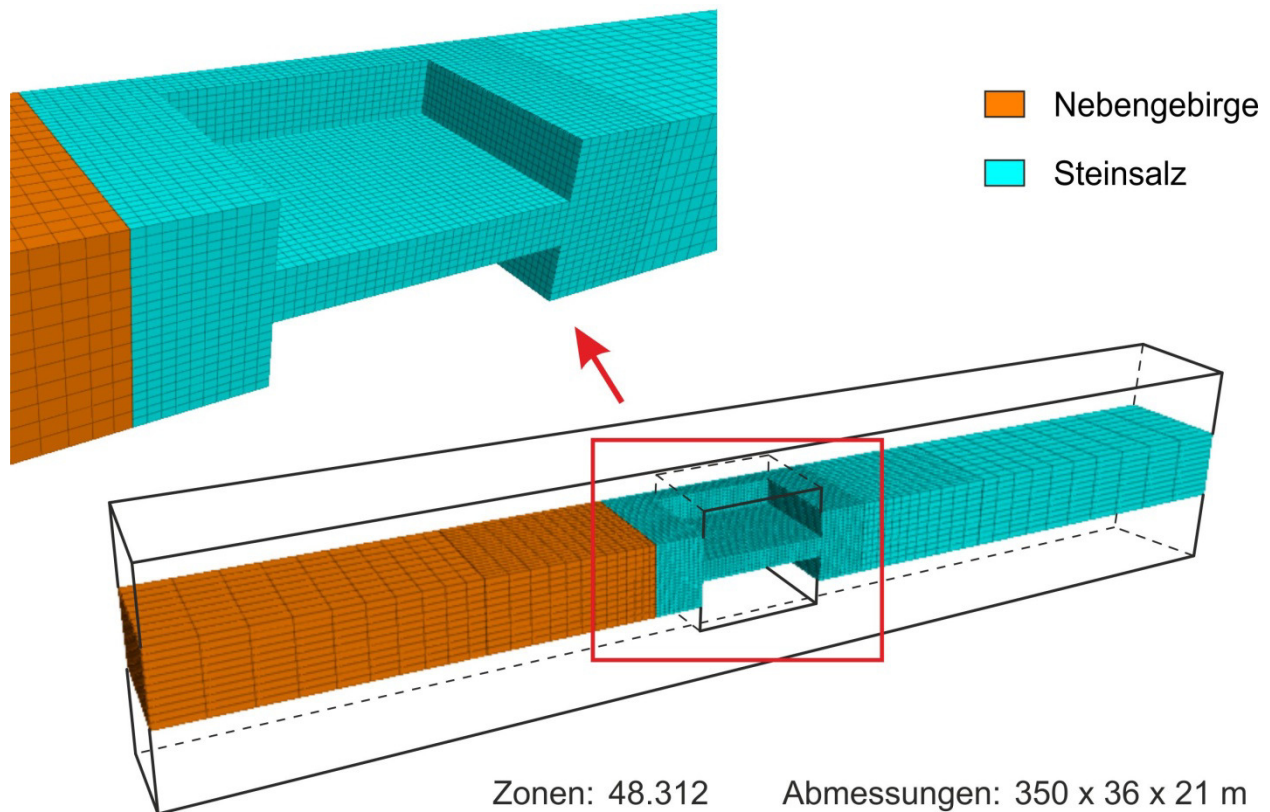
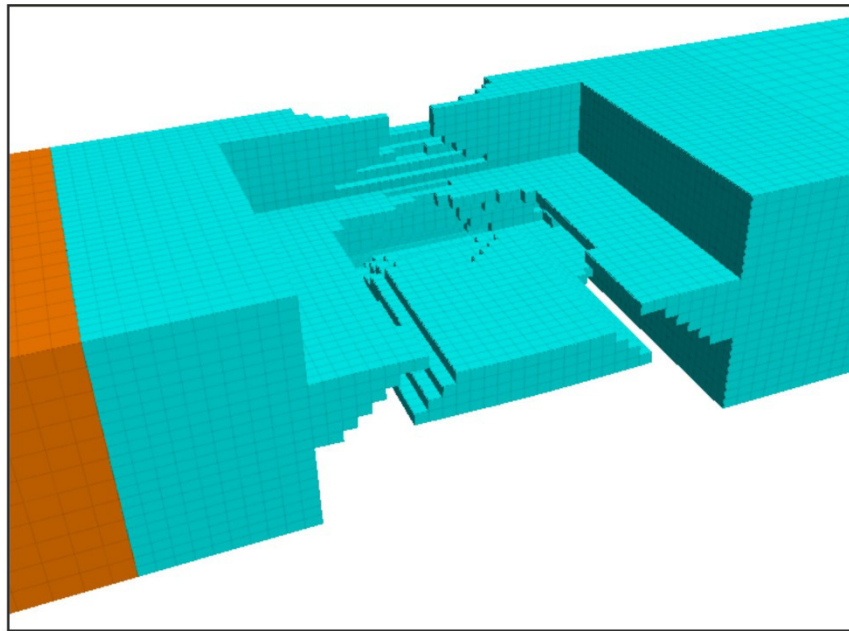


Bild 6.12: Funktionsmodell FM-1

Die Schädigungsprozesse im Tragsystem werden mit Hilfe des Stoffmodells *Lux/Wolters* abgebildet, s. Kapitel 5.1. Dieses Modell ist gut geeignet zur Beschreibung moderater Entfestigungsprozesse, nicht aber zur Abbildung von starker Entfestigung bis zur Restfestigkeit. Aus diesem Grund werden hier zusätzliche Kriterien zur Identifizierung stark entfestigter/ausgebrochener Tragelemente (Pfeiler im Restfestigkeitszustand, Schweben im Bruch) angewendet. Die Identifizierung erfolgt durch die Festlegung kritischer Zahlenwerte für die durch das Stoffmodell *Lux/Wolters* sich entwickelnde Dilatanz bzw. die schädigungsinduzierten Verzerrungen. Sobald der festgelegte kritische Zahlenwert entsprechend dem ausgewählten Kriterium erreicht bzw. überschritten wird, wird die entsprechende Zone entfernt und es erfolgt eine statisch äquivalente Spannungumlagerung. Durch diese Vorgehensweise wird im Funktionsmodell FM-Asse 1 der allmähliche Schweben- und Pfeilverbruch modelliert.

Bild 6.13 zeigt für einen ausgewählten Berechnungslauf den Zustand der Schweben- und Pfeiler am Ende der Simulation. Es ist deutlich zu sehen, dass sowohl in der Schweben- als auch im Pfeiler relativ viele Modellzonen entsprechend der vorstehend beschriebenen

Vorgehensweise entfernt worden sind. Deutlich zu erkennen ist in *Bild 6.13* der rechnerisch ermittelte verbleibende Schwebenring, welcher in ähnlicher Art auch in situ beobachtet worden ist. *Bild 6.14* zeigt eine Fotografie eines derartigen in situ beobachteten Schwebenrings.



Projekt: ASSE II
Modell: FM Asse 1

Zonen: 48.312
Abmessungen: 350 x 36 x 21 m

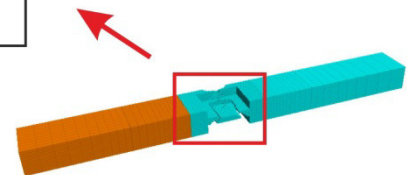


Bild 6.13: Darstellung des berechneten Schweben- und Pfeilverbruchs für einen ausgewählten Berechnungslauf

Neben der Erarbeitung erster eigener Erkenntnisse zum Schweben- und Pfeilerbruchverhalten sollten mit Funktionsmodell FM-1 auch erste Erkenntnisse dazu aufgebaut werden, unter welchen Randbedingungen sich die in situ beobachteten Pfeilerstauchungsraten im Rahmen der numerischen Simulationen nachvollziehen lassen. Es ist dazu eine umfangreiche Variationsanalyse durchgeführt worden mit dem Ergebnis, dass sich die in situ beobachteten Pfeilerstauchungsraten mit dem Funktionsmodell FM-1 nur dann nachvollziehen lassen, wenn der vor der Kammerauffahrung angesetzte Ausgangsspannungszustand signifikant reduziert wird. Untersuchungen zur Identifizierung des Grundes für die Notwendigkeit, den Ausgangsspannungszustands in einem derartigen Maße reduzieren zu müssen, werden im nachstehenden Kapitel anhand des Funktionsmodells FM-2 durchgeführt, in das ein großräumiger Gebirgsausschnitt sowie eine gesamte Kammerreihe implementiert sind.



Bild 6.14: Fotografie eines nach einem Schwebenverbrauch verbliebenen Schwebenrings aus der Position der unter der Schwebe befindlichen Abbaukammer, IfG Leipzig (2009)

6.2.1.2 Abbildung der großräumigen Gebirgsbewegungen im Gesamtsystem

Mit dem Funktionsmodell FM-2 sind die wesentlichen Untersuchungen durchgeführt worden, die zur Aufstellung der auf numerischen Ergebnissen basierenden Hypothesen zu den Ursachen für das untypische Verhältnis von etwa 1:9 für die Stoßverschiebungen entsprechend Südstoß zur Nordstoß geführt haben, das aus den markscheiderischen Vermessungen bekannt ist, *ASSE-GmbH (2011a)*. Zusätzlich ist darauf geachtet worden, ob die aus In-situ-Messungen bekannte, noch in den 90-er Jahren begonnene Akzeleration der Pfeilerstauchungsraten, verursacht durch erhöhte Gebirgsverschiebungen, mit dem entwickelten Modell zumindest qualitativ simuliert werden kann.

Das Funktionsmodell FM-2 umfasst eine komplette Kammerreihe der Südflanke von der 490-m-Sohle bis zur 750-m-Sohle sowie einen relativ großräumigen Bereich des Deck- und Nebengebirges sowie des Liegendgebirges. Es werden auch einige der im Deck- und Nebengebirge vermuteten Störungszonen in der Nähe des geologischen Schnittes 2 sowie das nördlich der Kammern befindliche Carnallitgebirge berücksichtigt.

Bild 6.15 zeigt den Aufbau des Funktionsmodells FM-2. Der modellierte Gebirgsbereich hat eine Breite von 6500 m und eine Höhe von 2400 m. Das Modell ist jedoch quasi-zweidimensional, d.h. der Gebirgsbereich wird zwar mit FLAC3D modelliert, hat aber in der dritten Dimension nur eine Ausdehnung von einer einzelnen Zone (Scheibe im ebenen Verzerrungszustand). Die Kammern werden daher im Funktionsmodell FM-2 als unendlich lange Strecken modelliert, während die Kammerpfeiler nicht berücksichtigt werden. Das gesamte Berechnungsgebiet und insbesondere die Kammerschweben sind relativ grob diskretisiert, so dass sich eine Gesamtanzahl von nur 12.952 Zonen ergibt.

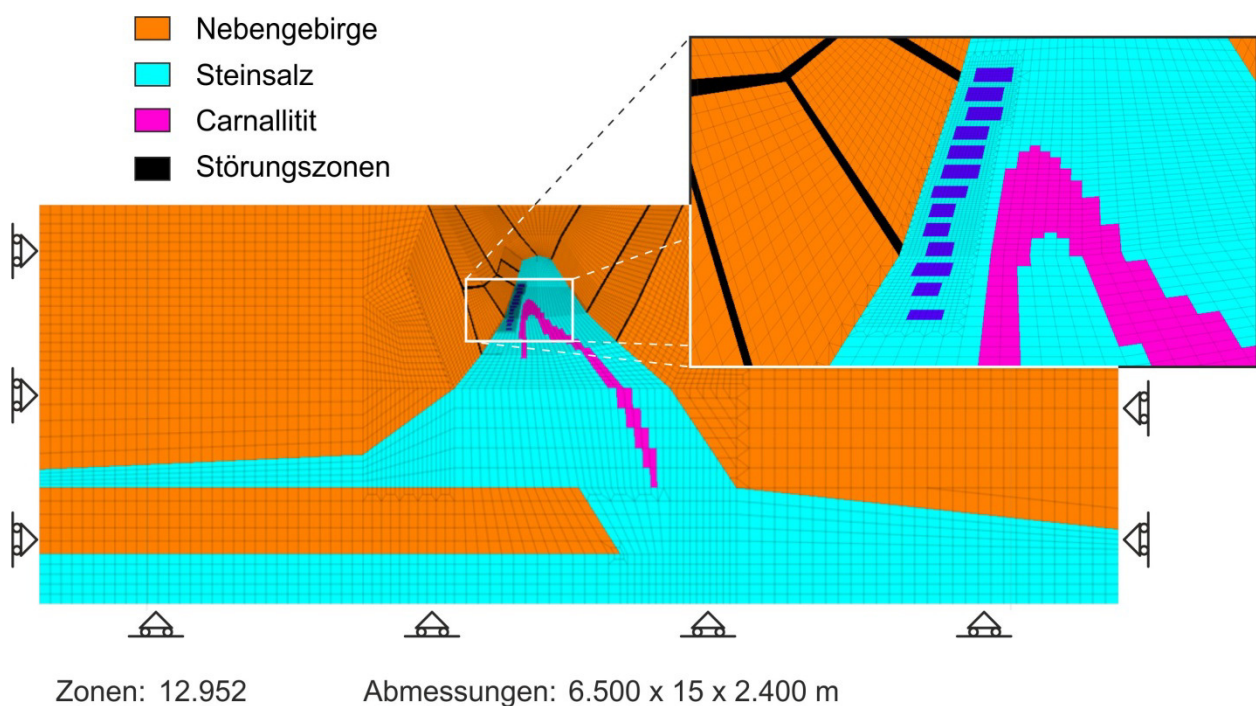


Bild 6.15: Funktionsmodell FM-2

Das Primärspannungsfeld für das Funktionsmodell FM-2 konnte aufgrund des komplexen geometrischen Gebirgsaufbaus nicht wie üblich in das Berechnungsmodell eingepreßt werden, sondern musste durch Vorgabe der jeweiligen Gesteinsdichten sowie weiterer Gesteinseigenschaften über eine vorlaufende aufwendige rechnerische Simulation mit Annahme viskoser Materialeigenschaften für das Salinargebirge (fiktiver Zeitraum von 1 Mio. a) ermittelt werden.

Nachfolgend werden die aus den numerischen Untersuchungen mit dem Funktionsmodell FM-2 erarbeiteten Hauptkenntnisse zum Systemverständnis kurz dargestellt.

(a) Bedeutung der Störungszonen und der strukturellen Ausbildung des Nebengebirgsblocks

Bild 6.16 zeigt die flächenhafte Verteilung der rechnerisch ermittelten Verschiebungen kurz vor dem numerisch bedingten Berechnungsabbruch (Jahr 1996). Es ist eine deutliche Bewegung des Nebengebirgsblocks zu ersehen, der sich zwischen den Störungszonen befindet, die auf dem Niveau der 490-m-Sohle und auf dem Niveau der 700-m-Sohle auf den Salzsattel treffen. Als Ursache für dieses kinematische Spezifikum werden die geringe Festigkeit der Störungszonen und eine daraus resultierende erhöhte Gleitfähigkeit auf den Störungszonen gesehen.

Aus Bild 6.16 ist allerdings auch zu ersehen, dass sich nicht der gesamte Gebirgsblock in das Grubengebäude schiebt, sondern nur ein Teil des Gebirgsblocks. Dieser Effekt ist bei nahezu allen durchgeführten Berechnungen zu beobachten.

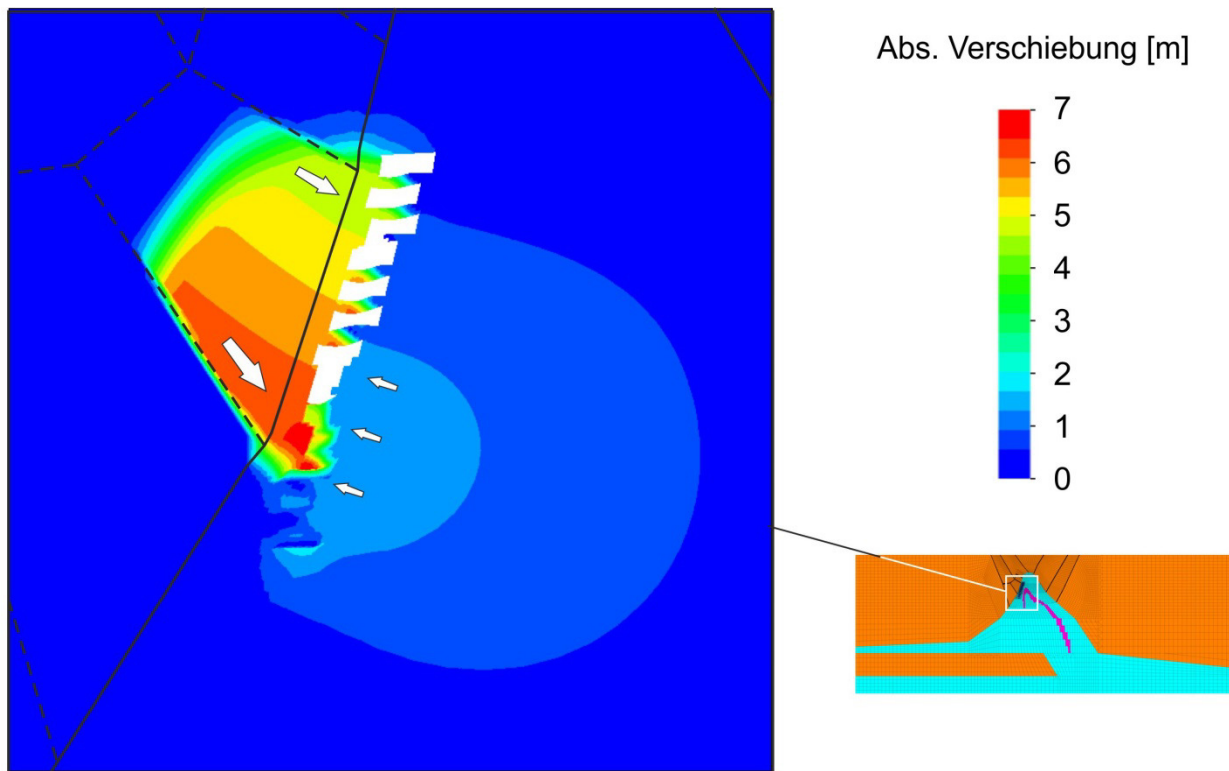


Bild 6.16: Flächenhafte Darstellung der Südstoß- und Nordstoßverschiebung im Jahr 1996

(b) Akzeleration der Pfeilerstauchungsraten

Die in Bild 6.17 dargestellten absoluten Stoßverschiebungen zwischen der 700-m-Sohle und der 679-m-Sohle zeigen ab dem Jahr 1990, nachdem in der numerischen Simulation sukzessive die Schweben versagen, einen drastischen Anstieg insbesondere der Verschiebungen des Südstoßes.

Damit ist es gelungen, im Rahmen dieser Untersuchungen mit dem Funktionsmodell FM-2 erstmals qualitativ die Akzeleration der Südstoßdeformationen numerisch abzubilden.

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass der Anstieg der Stoßverschiebungsraten bei der Verwendung des Funktionsmodells FM-2 signifikant überschätzt wird, da die Tragwirkung der Kammerpfeiler in dem 2D-Modell nicht berücksichtigt wird. Eine quantitativ bessere Übereinstimmung der numerisch ermittelten Verschiebungsraten mit den In-situ-Messwerten wird bei der Anwendung eines im Vergleich zum Funktionsmodell FM-2 erweiterten quasi-3D-Streifenmodells mit der Berücksichtigung der Pfeiler als Tragelementen erwartet.

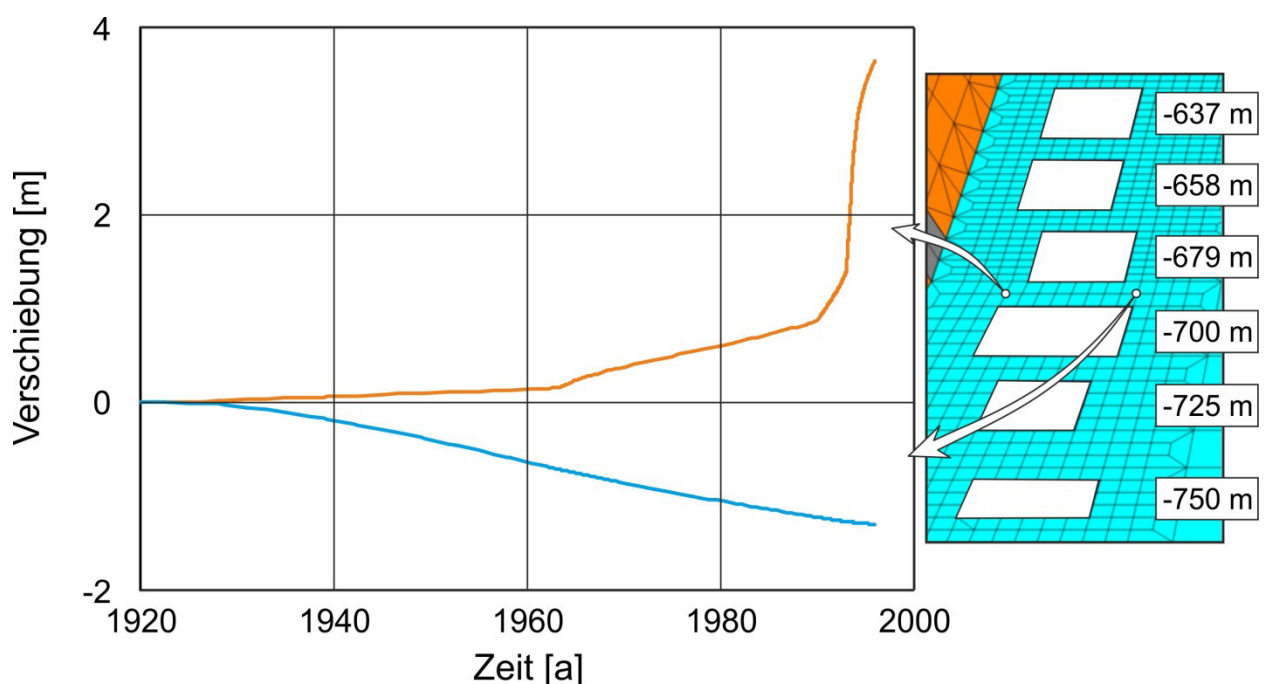


Bild 6.17: Zeitliche Entwicklung der Südstoß- und Nordstoßverschiebung

6.2.2 Realitätsnahe Abbildung des Systemtragverhaltens mit den Hauptmechanismen

6.2.2.1 Q-3D-Modell als repräsentativer idealisierter Ausschnitt für das Gesamtsystem

Das quasi-dreidimensionale 36 m-Streifenmodell (Q-3D-Modell) umfasst eine komplette Kammerreihe der Südflanke von der 490-m-Sohle bis zur 750-m-Sohle sowie einen relativ großräumigen Bereich des Deck- und Nebengebirges sowie des Liegendgebirges. Ähnlich wie im Funktionsmodell FM-2 werden auch im Berechnungsmodell Q-3D-Modell einige der im

Deck- und Nebengebirge vermuteten und in den geotektonischen Schnitten dargestellten Störungszonen sowie das nördlich der Abbaukammern befindliche Carnallitgebirge explizit als Homogenbereiche berücksichtigt. Allerdings werden im Gegensatz zum Funktionsmodell FM-2 beim Berechnungsmodell Q-3D-Modell nunmehr realitätsnah auch die Kammerpfeiler berücksichtigt.

Das Berechnungsmodell Q-3D-Modell besitzt aus Symmetriegründen in streichender Richtung eine Breite von 36m, da von der 511-m-Sohle bis einschließlich zur 679-m-Sohle eine durchschnittliche Halbkammerbreite von 30 m und eine durchschnittliche Halbpfeilerbreite von 6 m angesetzt werden kann. Für die 490-m-Sohle werden eine durchschnittliche Halbkammerbreite von 18 m und eine durchschnittliche Halbpfeilerbreite von 18 m angesetzt. Auf der 700-m-Sohle befinden sich Kammern mit einer durchschnittlichen Breite von 24 m, die sich mit zwei Halbpfeilern mit einer durchschnittlichen Halbpfeilerbreite von 6 m ebenfalls zu einer Gesamtbreite von 36 m ergänzen. Für die 725-m-Sohle und die 750-m-Sohle werden eine durchschnittliche Halbkammerbreite von 27 m und eine durchschnittliche Halbpfeilerbreite von 9 m angesetzt.

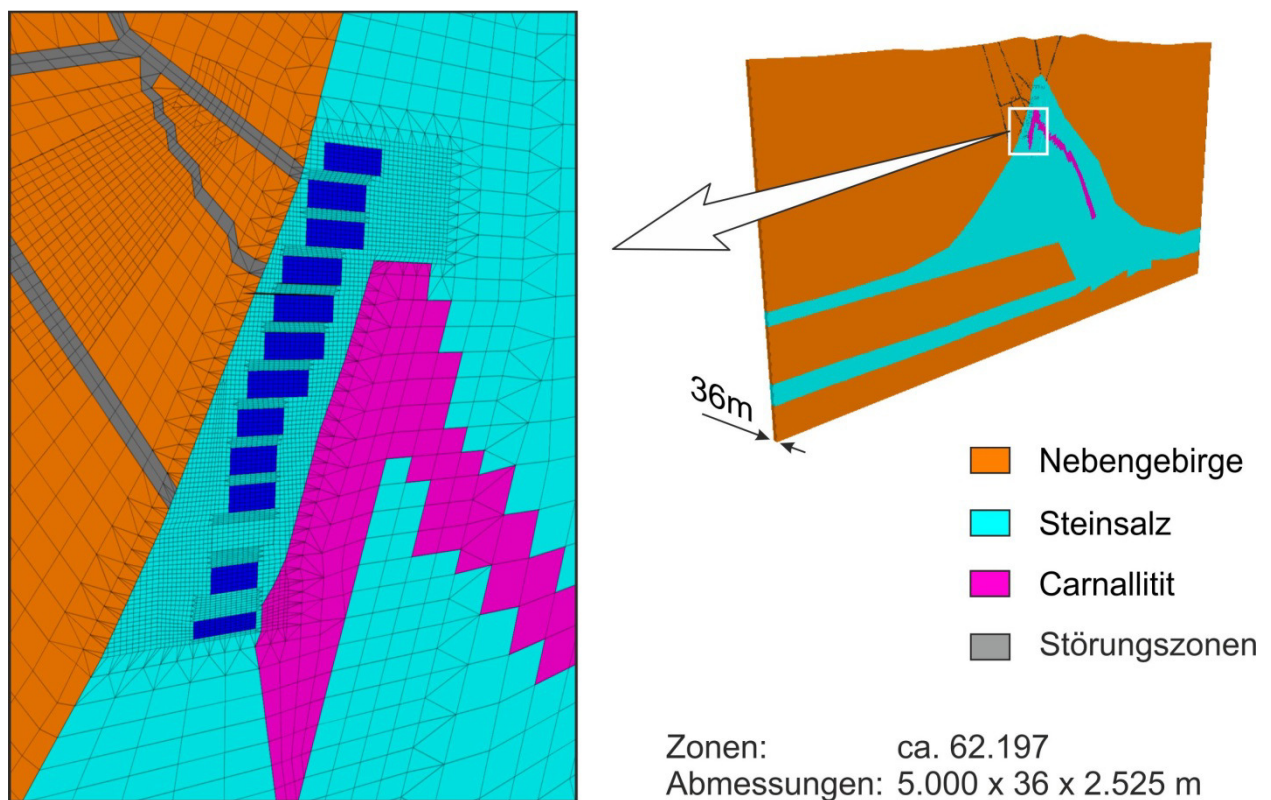


Bild 6.18: Berechnungsmodell Q-3D-Modell

Wie aus *Bild 6.18* zu ersehen ist, ist der Diskretisierungsgrad im Q-3D-Modell im Nahfeld des Grubengebäudes analog dem Diskretisierungsgrad des Funktionsmodells FM-2. So können die in diesem Gebirgsbereich ablaufenden Deformations- und später Entfestigungs- bzw. Bruchprozesse numerisch mit guter Genauigkeit abgebildet werden. Mit zunehmender Entfernung zum Grubengebäude wird die Modelldiskretisierung im Q-3D-Modell allerdings relativ schnell vergrößert, so dass bei der Diskretisierung dieses Gebirgsbereichs Zonen in einem erheblichen Umfang eingespart worden sind und somit eine signifikante Verkürzung der Rechenzeit erzielt worden ist. Dadurch ist die Durchführung einer ausführlichen Sensitivitätsanalyse mit dem Q-3D-Modell möglich geworden. Für diese Art der Diskretisierung sind spezielle Algorithmen entwickelt und erstmals angewendet worden, die eine einfache und kleinräumige Aufweitung der Diskretisierung bei Erhalt der numerischen Qualität ermöglichen (s. Kapitel 7.1.4).

Dieses Modell wird entsprechend der in Kapitel 3.1 vorgeschlagenen Klassifizierung in Schwierigkeitsklasse 2 eingestuft: es benötigt nur eine Zerteilungsfläche und beinhaltet ca. 400 Zerteilungen.

6.2.2.2 Validierung des Q-3D-Modells / Erstellung von Haupthypothesen zum Systemtragverhalten

Bei der Festlegung der charakteristischen In-situ-Messwerte für die Re-Analyse der geschichtlichen Entwicklung des Grubengebäudes wurden die Gebirgsverschiebungen als prinzipiell besser geeignet für die Erfassung globaler Entwicklungen im Tragsystem im Vergleich zu den sensitiv gegenüber lokalen Einflüssen reagierenden Gebirgsbeanspruchungen eingeschätzt. Aus diesem Grund wurden die in einem umfangreichen Maße zur Verfügung stehenden Pfeilerstauchungsraten zu einem direkten Vergleich mit den Ergebnissen numerischer Simulationen herangezogen.

Aus *Bild 6.19* ist zu erkennen, dass der im Berechnungsmodell abgebildete Schnitt 2 mit seiner Störungszonenstruktur eher dem Bereich der Kammerreihen 4 bis 6 entspricht. Aus diesem Grund ist es als sinnvoll eingeschätzt worden, die rechnerisch mit dem Modell ermittelten Pfeilerstauchungsraten mit den entsprechenden Messwerten aus dem Bereich der Kammerreihen 4 bis 6 zu vergleichen. *Bild 6.19* zeigt die orange bzw. dunkelblau markierten Extensometer-messstellen.

In *Bild 6.20* sind die In-situ-Messwerte für die in *Bild 6.19* markierten Extensometer dargestellt, BfS (2010).

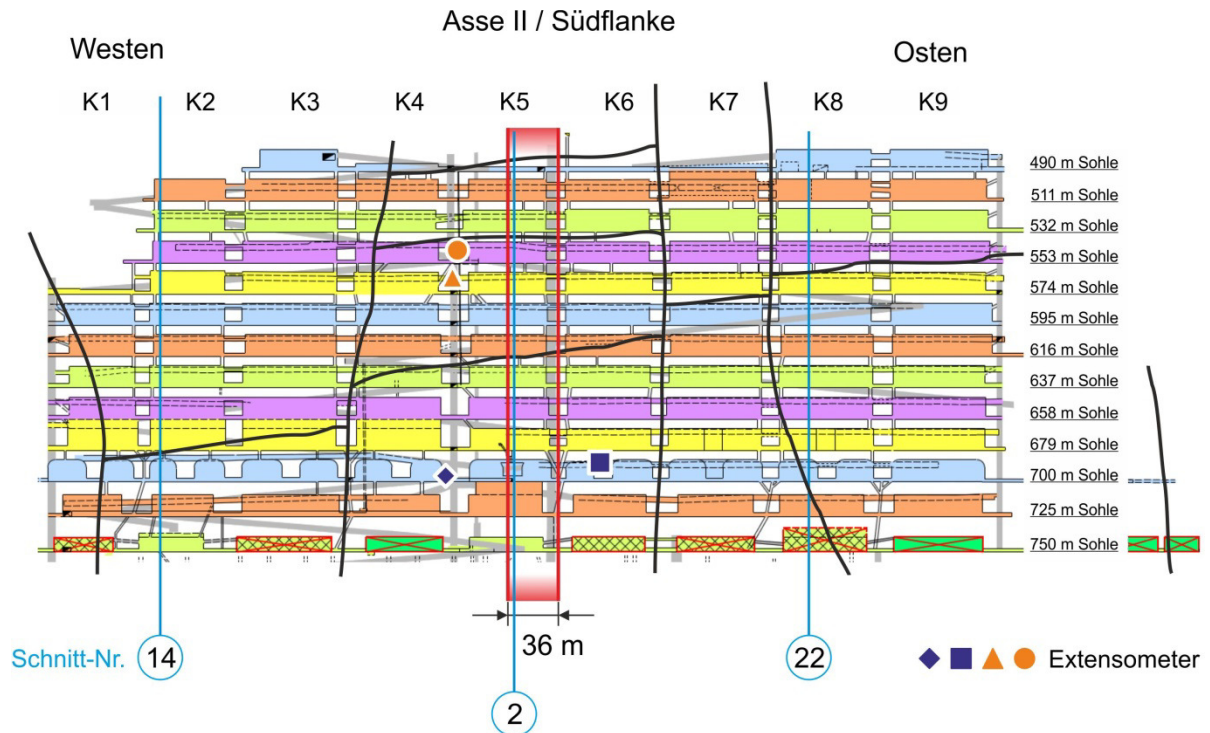


Bild 6.19: Referenz-Extensometer in Pfeilern in der Südflanke für den Vergleich von Berechnungs- und Messwerten (Schnitt 1), nach Wallmüller (2012)

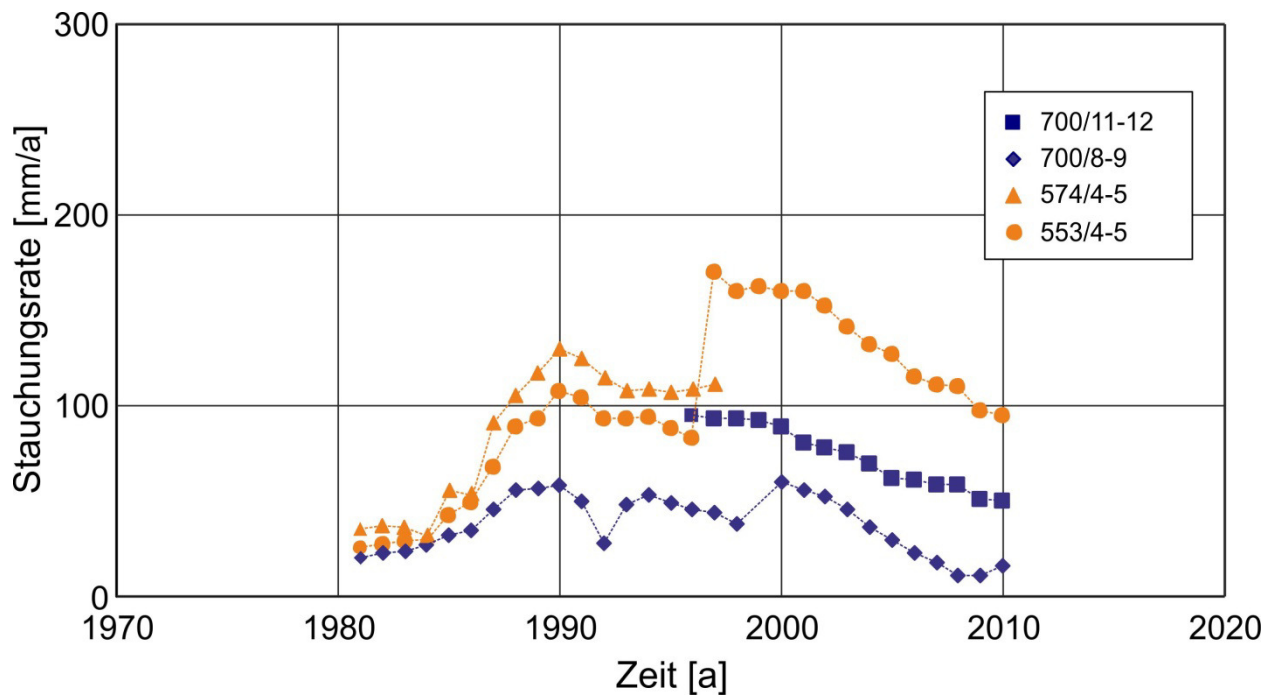


Bild 6.20: In-situ-Messwerte für die Pfeilerstauchungsraten in der Nähe der Kammerreihe 5, BfS (2010)

Aus dem Verlauf der In-situ-Messwerte sind zwei Phasen deutlich zu erkennen: die erste Phase ab Mitte der 80-er Jahre bis Ende der 90-er Jahre mit einem beschleunigten Verlauf und die zweite Phase ab Ende der 90-er Jahre bis zum Jahr 2010 (der aktuelle Stand zum Zeitpunkt der Analyse) mit einem degressiven Verlauf. Auffallend ist dabei eine untypische Verteilung der Intensität der Gebirgsbewegung: in den höher liegenden Sohlen ist die Intensität wesentlich stärker als in tiefer liegenden Sohlen.

Im Rahmen des Verständnisaufbaus für das vorstehend beschriebene Systemverhalten wurden einige wesentliche Hypothesen erarbeitet. Nachstehend werden diese Arbeitshypothesen einzeln erläutert.

(1) Hypothese zur Bedeutung der Störungszonen und zur Ausbildung des Nebengebirgsblocks

Eine vertiefende numerische Untersuchung mit dem Q-3D-Modell zum Prozess der Hangendgebirgsverschiebung hat eine deutlich verstärkte Bewegung des Nebengebirgsblocks in Richtung Grubengebäude gezeigt. Dieser Gebirgsblock befindet sich zwischen den Störungszonen *S3* und *S2a*, die auf dem Niveau der 490-m-Sohle und auf dem Niveau der 700-m-Sohle auf den Salzsattel treffen, *Bild 6.21*. Als Ursache für dieses auffällige Verhalten sind die geringe Festigkeit des Störungszonengebirges und eine daraus resultierende erhöhte Gleitfähigkeit auf den Störungszonen zu sehen.

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit dem schon mithilfe des Funktionsmodells FM-2 (2D-Modell) festgestellten Zusammenhang.

(2) Hypothese zur Orientierung der Anisotropie der Materialeigenschaften im Nebengebirge

Weiterhin wurden die Materialeigenschaften des Nebengebirges mangels belegter Befunde aus Labor oder Feld (Imponderabilien) in Bezug auf die Anisotropie variiert: sedimentationsbedingte Schichtung (→ bankparallele Schichtungsrichtung im Stoffmodell *Ubiquitous Joint*) bzw. durch den Salzaufstieg entstandene Trennflächen (→ bankrechte Schichtungsrichtung im Stoffmodell *Ubiquitous Joint*). In Schichtungsrichtung wurden jeweils reduzierte Scherfestigkeiten angesetzt (s. Kapitel 5.3). Diese Untersuchungen sollten zur Verbesserung der physikalischen Modellierung des Nebengebirges beitragen. Es wurde dabei festgestellt, dass bei der Variation der Orientierung der Anisotropie der Materialeigenschaften das Deformationsverhalten im Nebengebirge und somit auch die zeitliche Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten im Tragsystem signifikant verändert werden.

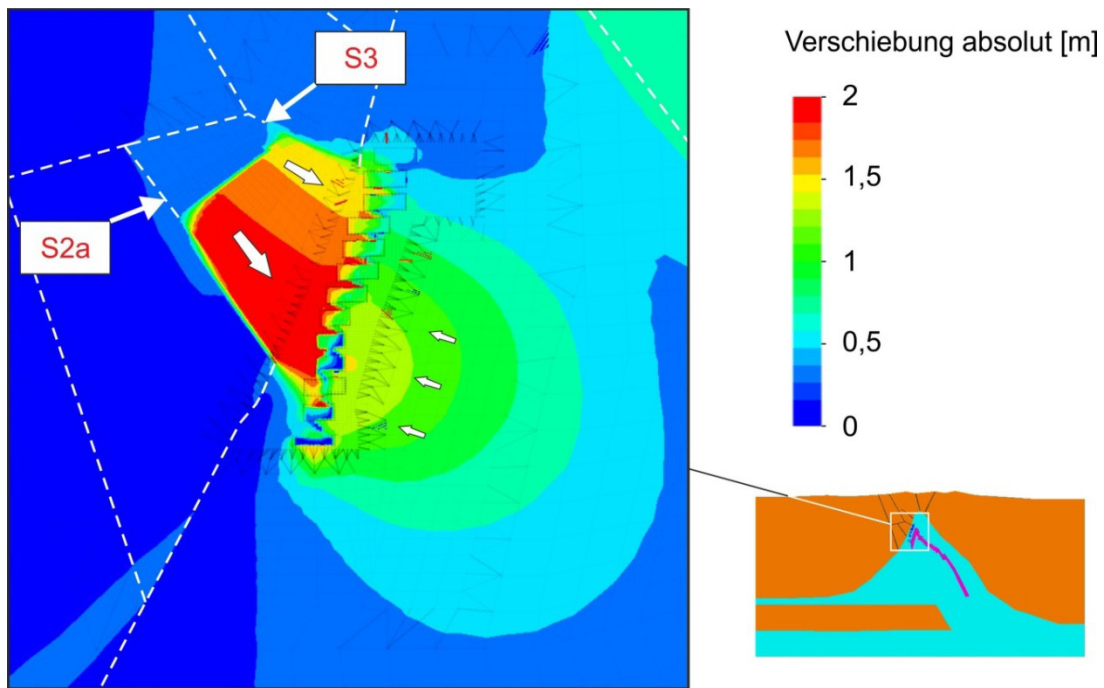


Bild 6.21: Flächenhafte Darstellung der rechnerisch ermittelten Verschiebungen mit einer verstärkten Bewegung des Nebengebirgsblocks im Jahr 1996

Prinzipiell lässt sich festhalten, dass mit einer Berücksichtigung der Anisotropie der Materialeigenschaften des Nebengebirges und hier der Annahme einer bankparallelen Schichtung wahrscheinlich am ehesten das reale standortspezifische Verhalten des Nebengebirges wiedergegeben werden kann. Auf jeden Fall kann zumindest durch die Kombination der jetzt gewählten Ansätze für die physikalische Modellierung das Deformationsverhalten des Abbaufeldes für den Beobachtungszeitraum mit dem Indikator Pfeilerstauchungsrate zufriedenstellend re-analysiert werden, *Bild 6.24*.

(3) Hypothese zur Bedeutung des Versatzdruckaufbaus in der Restabilisierungsphase

Als Ursache für den degressiven Verlauf der Pfeilerstauchungsraten ab Ende der 90-er Jahre wird vor allem der allmähliche Aufbau eines Kompaktionsdrucks im Versatz angesehen. Anhand der in *Bild 6.22* dargestellten zeitlichen Entwicklung der rechnerisch ermittelten Horizontalspannung σ_x kann dieser allmähliche Aufbau des Kompaktionsdrucks im Versatz gut nachvollzogen werden. Im Jahr 2004 liegt die Horizontalspannung σ_x in den meisten Versatzzonen noch unter 0,5 MPa, bis zum Jahr 2080 steigt in vielen Versatzzonen die Horizontalspannung σ_x allerdings auf über 1 MPa, teilweise sogar über 2 MPa an. Die ansteigende Horizontalspannung σ_x induziert die Änderung in der Tendenz der Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten und führt zu einem degressiven Verlauf.

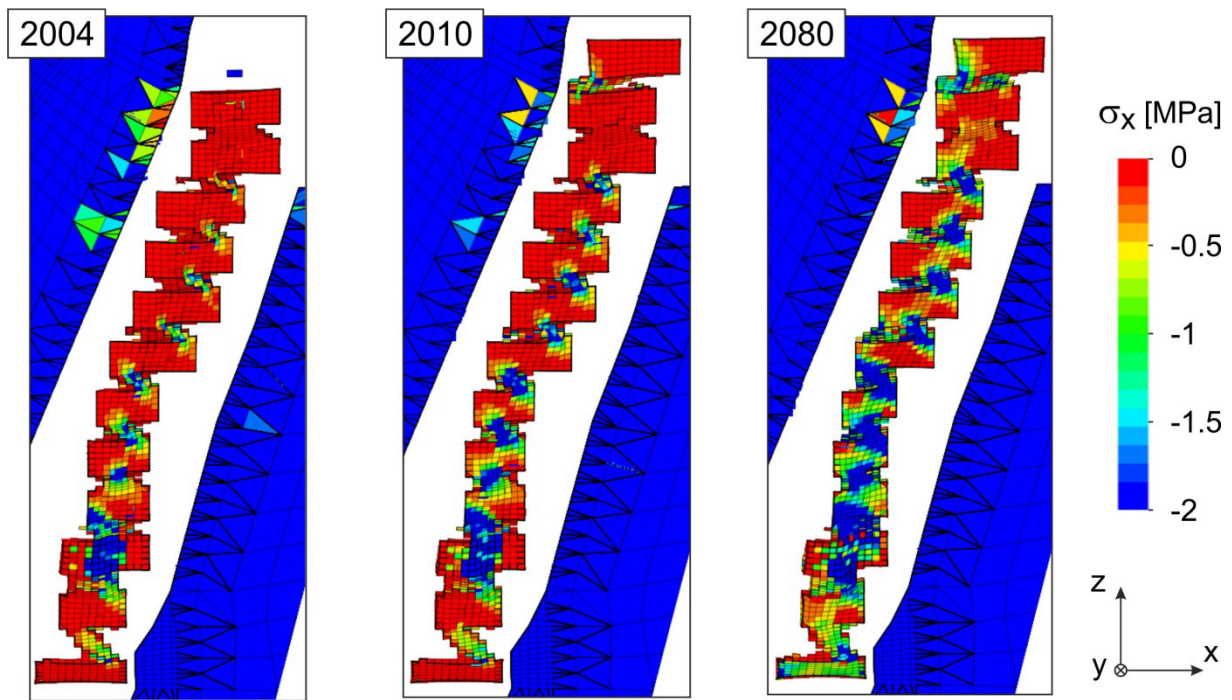


Bild 6.22: Zeitliche Entwicklung der rechnerisch ermittelten Horizontalspannung σ_x in den versetzten Abbaukammern

(4) Hypothese zur Ausbildung des Traggewölbes im Nebengebirge

Als eine weitere Ursache für den degressiven Verlauf der Pfeilerstauchungsraten kann neben dem allmählichen Aufbau eines Kompaktionsdrucks im Versatz die Ausbildung eines Traggewölbes im nichtsalinaren Nebengebirge des südlichen Abbaufeldes identifiziert werden, da die Ausbildung eines derartigen Traggewölbes zu einer Entlastung der Pfeiler im südlichen Abbaufeld führt. Die Ausbildung eines solchen Traggewölbes im nichtsalinaren Deckgebirge kann ersehen werden anhand der in Bild 6.23 dargestellten rechnerisch ermittelten Verteilung der maximalen Hauptspannung σ_1 für verschiedene Zeitpunkte während des Kammerrückbaugeschehens von 1920 bis 1963, ab Beginn des Schweben- und Pfeilerverbruchs im Jahr 1981 sowie nach dem Kammerversatzzeitraum, d.h. nach 2004. Anhand von Bild 6.23 ist deutlich zu erkennen, dass sich in der numerischen Simulation im Bereich des nichtsalinaren Nebengebirges des südlichen Abbaufeldes insbesondere nach dem Beginn des Schweben- und Pfeilerverbruchs ein Traggewölbe ausbildet, das sich allerdings nach Ende der Versatzmaßnahmen auch langsam wieder reduziert. Die Gewölbefußpunkte liegen dabei oberhalb und unterhalb des modellierten Grubengebäudes im Bereich der Baufeldränder.

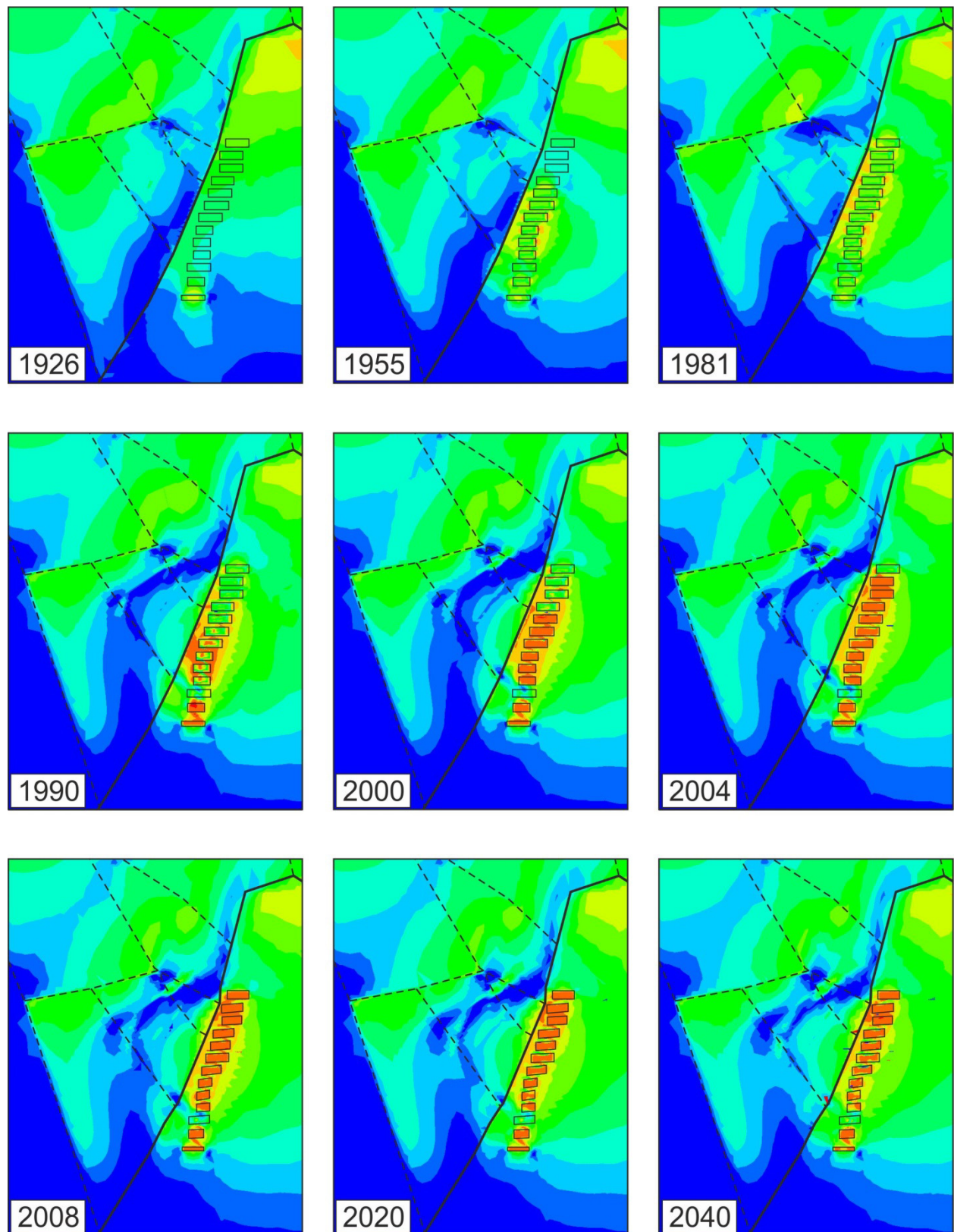


Bild 6.23: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Maximalspannungen mit Traggewölbebildung im nichtsalinaren Hangend-/Nebengebirge

Vor dem Hintergrund der erarbeiteten und vorstehend beschriebenen Hypothesen wurde im Rahmen der numerischen Simulationen zur Re-Analyse der geschichtlichen Entwicklung des Grubengebäudes nunmehr eine sehr gute Übereinstimmung mit den charakteristischen Messwerten (Pfeilerstauchungsraten) erzielt, *Bild 6.24*.

Die Re-Analyse wurde am Anfang des Jahres 2012 erstellt und basierte auf den In-situ-Messwerten bis zum Jahr 2010, *Lux u.a. (2012)*. Anschließend wurde eine Kurzzeitprognose für das offenstehende Grubengebäude erstellt. Wie aus dem *Bild 6.24* zu erkennen ist, wurde diese Prognose in Laufe der Jahre durch die nun vorhandenen In-situ-Messwerte bis zum Jahr 2014 gut bestätigt. Damit liegt hier ein weiteres wesentliches Indiz für die Plausibilität der Annahmen, Voraussetzungen und Arbeitshypothesen zur physikalischen Modellierung zur Erfassung des Systemtragverhaltens vor.

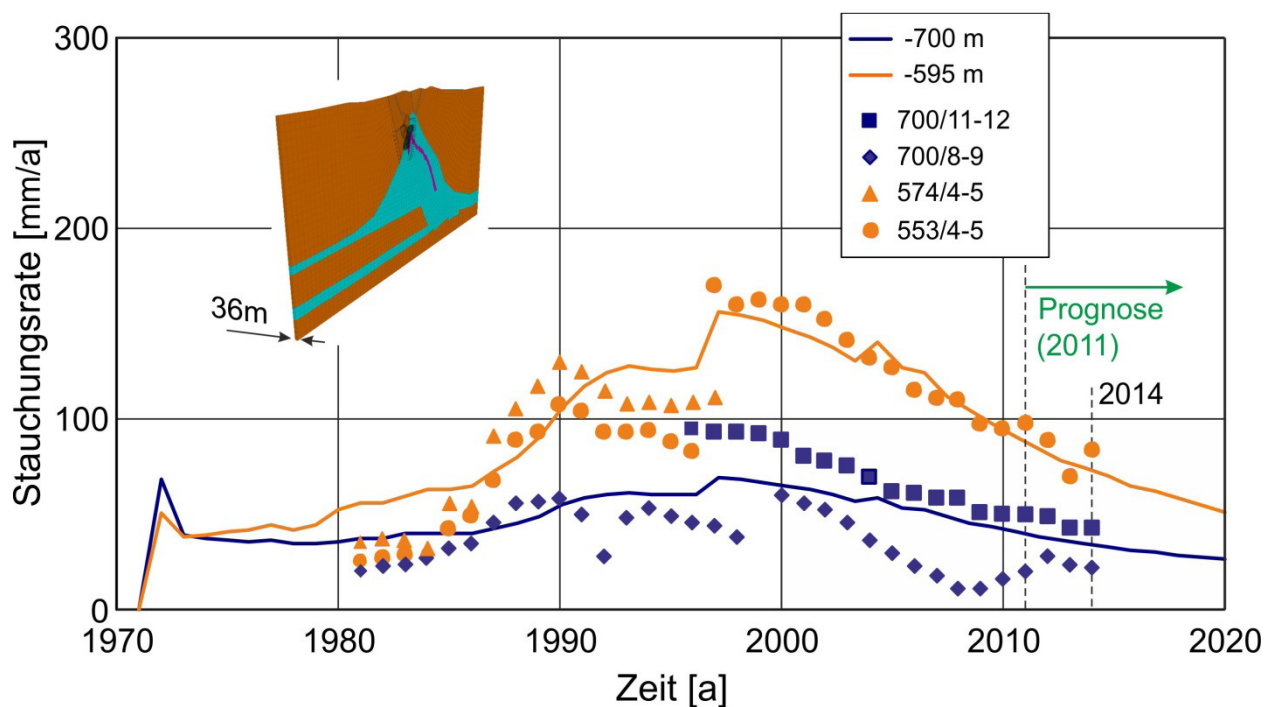


Bild 6.24: Vergleich von numerischen Ergebnissen mit In-situ-Messwerten für Pfeilerstauchungsraten im Bereich einer repräsentativen mittleren Kammerreihe

6.2.3 Abschließende Vorbereitungen auf die Etappe II

6.2.3.1 Optimierung in der Abbildung der Entfestigungsprozesse im Tragsystem

In Vorbereitung auf die bevorstehenden numerischen Simulationen mit dem 3D-Modell für das Gesamtsystem wurde nach alternativen Vorgehensweisen im Rahmen der aktuellen numerischen

Simulationen zur Reduzierung der Rechenzeiten gesucht. Diese vorbereitenden Arbeiten wurden mit Hilfe des Q-3D-Modells durchgeführt. Als besonders vielversprechend hat sich dabei die Entwicklung alternativer Vorgehensweisen für die Abbildung der Entfestigungsprozesse nach Auffahrung der Abbauhohlräume herausgestellt, weil hier aufgrund der Komplexität der Vorgänge die längsten Rechenzeiten entstanden sind. Hintergrund sind die nach der bisherigen Vorgehensweise häufig notwendigen Eingriffe in den Simulationslauf, um beispielsweise auf entfestigte Bereiche in der Modellgeometrie zu reagieren und das System wieder auszubalancieren. Hier wurde durch Einführung variabel einstellbarer Entfestigungsgrade und einer höheren Aktivierungsfrequenz eine deutliche Reduzierung der Rechenzeiten bei stabilen und gleichwertig guten Berechnungsergebnissen erzielt, *Bild 6.25*.

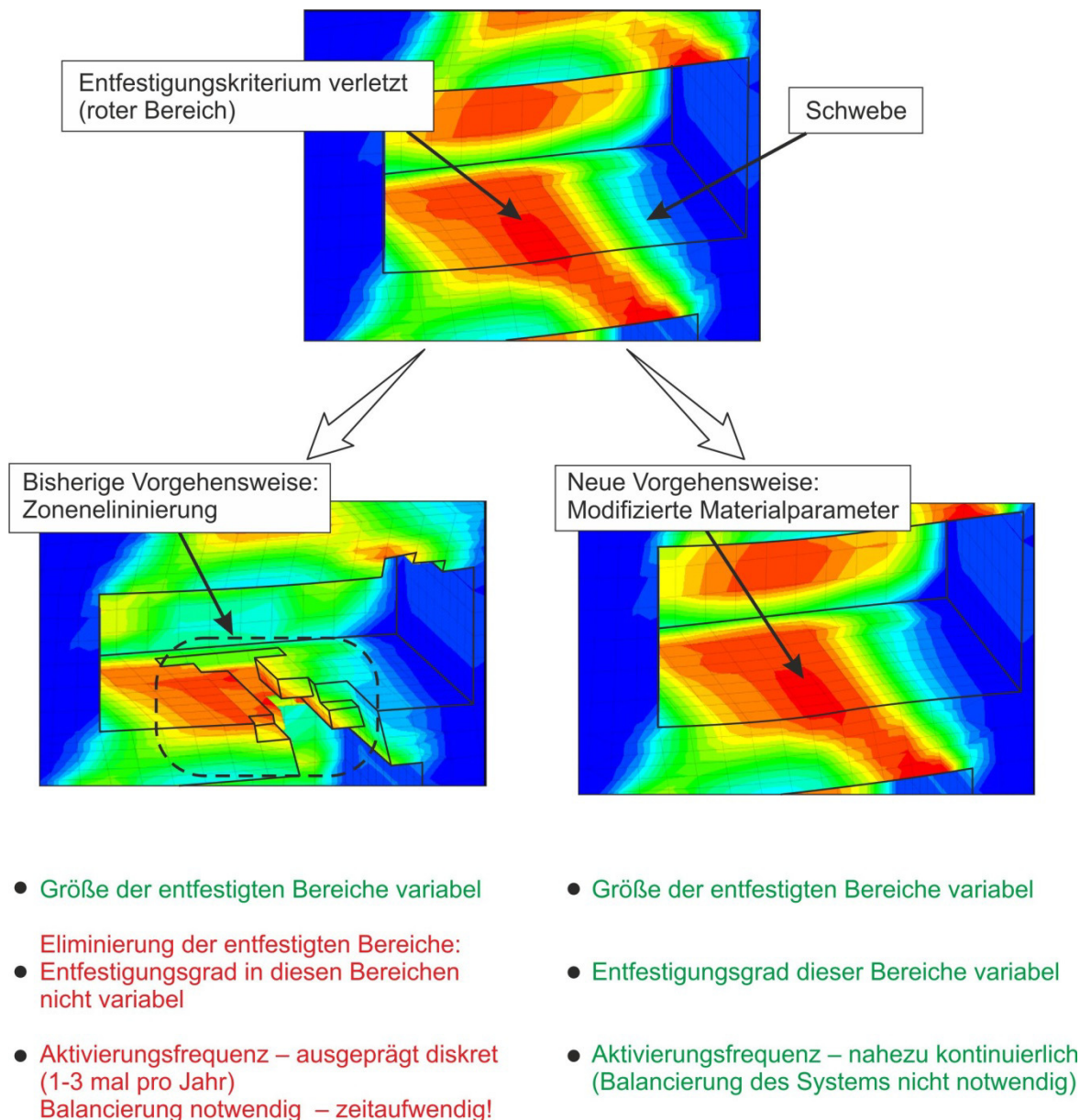


Bild 6.25: Alternative Vorgehensweise zur Modellierung der Entfestigungsprozesse

Nachrechnungen der bisherigen Simulationsläufe zur Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten ergaben, dass der Verlauf im Vergleich zu den vorhandenen Messwerten mit den vorgenommenen Modifizierungen ähnlich plausibel nachvollzogen werden kann wie schon zuvor, dass diese Simulationen aber mit um einen Faktor von 4 bis 7 reduzierten Rechenzeiten und damit numerisch signifikant effektiver gelingen als vorher, *Bild 6.26*.

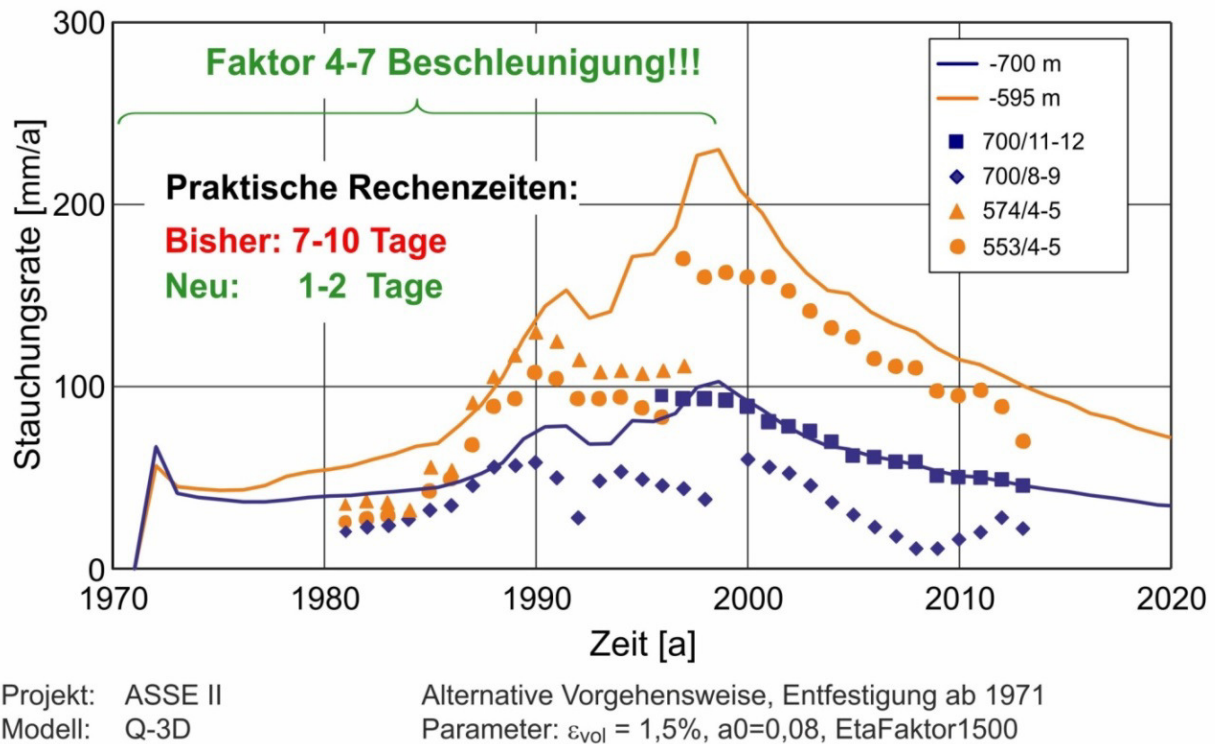


Bild 6.26: Beschleunigung der Rechenzeiten bei Anwendung einer neuen Vorgehensweise zur Abbildung der Entfestigungsprozesse

Eine weitere Entwicklung der Modellierung besteht darin, dass die im numerischen Modell bis dato zeitlich erst nach vollständiger Kammerraffung eingesetzten entfestigenden Faktoren in neueren Berechnungen von Anfang an berücksichtigt werden können und damit auch die Gewinnungsgeschichte des Bergwerks stärker berücksichtigt werden kann. Hierdurch ergab sich nunmehr auch eine direkte Verbindung des Beginns der Entfestigungsmechanismen an reale Ereignisse, d.h. an die Hohlraumraffung. Eine künstliche Festlegung des Anfangs dieser Entfestigungsprozesse (1970 bzw. 1980) ist nicht mehr erforderlich, *Bild 6.27*.

Ein weiterer interessanter Befund aus dieser weiterentwickelten Modellierung ist, dass die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in die Asse II/Südflanke offenbar in einer gebirgsmechanisch vergleichsweise ruhigen Phase der Entwicklung des Asse-Tragsystems bei konstanten Pfeilerstauchungsraten von ca. 30 mm/a stattfand. Die entfestigungsbedingte Akzeleration der Pfeilerstauchungen begann erst nach Abschluss der Einlagerung, was zum damaligen Zeitpunkt mit dem verfügbaren geomechanischen Instrumentarium nicht prognostizierbar war. Mit dem heute entwickelten geomechanischen Instrumentarium zur Tragwerksanalyse wäre bereits zum Zeitpunkt der Einlagerung eine Prognose der wenige Jahre später einsetzenden beschleunigten Entfestigung möglich gewesen, die mit den tatsächlich eingetretenen Ereignissen konsistent wäre. Rückschauend lässt sich vermuten, dass eine derartige Prognose zum damaligen Zeitpunkt wahrscheinlich auch Einfluss auf die seinerzeitigen Sicherheitsbetrachtungen und die Abfallablagerung gehabt hätte.

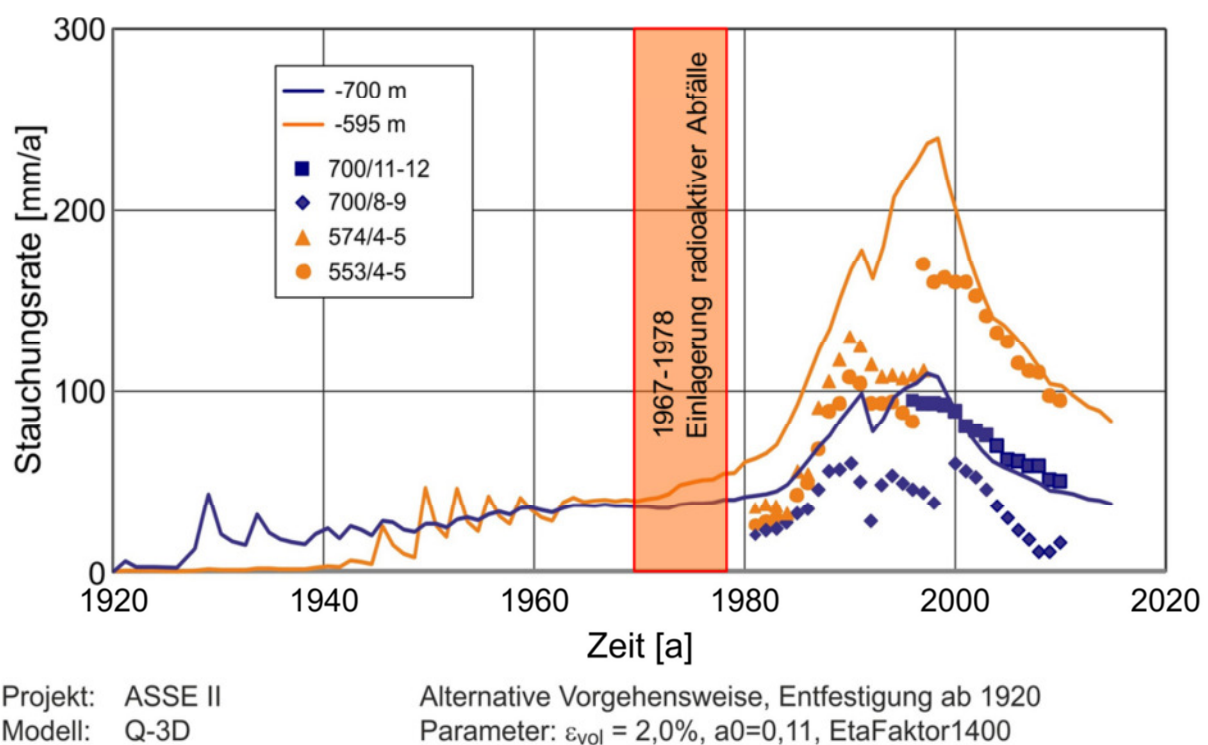


Bild 6.27: Vergleich gemessener (Einzelpunkte aus vier Extensometermessstellen) und simulierter (Linien) Pfeilerstauchungsraten, Messwerte bis 2010

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in Vorbereitung zu den numerischen Simulationen mit dem 3D-Gesamtmodell eine optimierte Vorgehensweise zur physikalischen Abbildung der Entfestigungsprozesse in Verbindung mit signifikant reduzierten Rechenzeiten entwickelt wurde.

Diese Reduzierung der Rechenzeiten bietet die Möglichkeit einer größeren Anzahl von Variationsanalysen, die auch beim komplexen 3D-Modell für das Gesamtsystem unvermeidbar werden, bedingt durch die Existenz von Imponderabilien im System.

6.2.3.2 Abschätzung der optimalen Modellgröße für die Abbildung des Gesamtsystems

Die Abschätzung der maximalen handhabbaren Modellgröße für das zukünftig zu erstellende komplexe 3D-Modell für das Gesamtsystem wird als letzter wesentlicher Schritt der Etappe I durchgeführt. Diese Abschätzung kann durch die Extrapolation des Aufwandes für die schon durchgeführten Variationsanalysen mit dem Q-3D-Modell vorgenommen werden, wäre jedoch erfahrungsgemäß ziemlich ungenau. Aus diesem Grund wurde hier zu einer möglichst präzisen Abschätzung der optimalen Modellgröße zusätzlich ein spezielles geometrisch tektonisch vereinfachtes 3D-Modell für die Hälfte der Südflanke (3D-GTV-Modell) mit einem vergleichsweise geringen Aufwand erstellt.

Dieses Modell wurde durch Extrusion des Q-3D-Modells (Spiegelung und Wiederholung des 36m-Streifenmodells) zur Abbildung des Westteils der Südflanke entwickelt, in dem das halbe Grubengebäude (Kammerreihe 1 bis 5) mit vereinfachter Geometrie, Nutzung von Symmetrien und einer vereinfachten geotektonischen Situation abgebildet wurde, *Bild 6.28*.

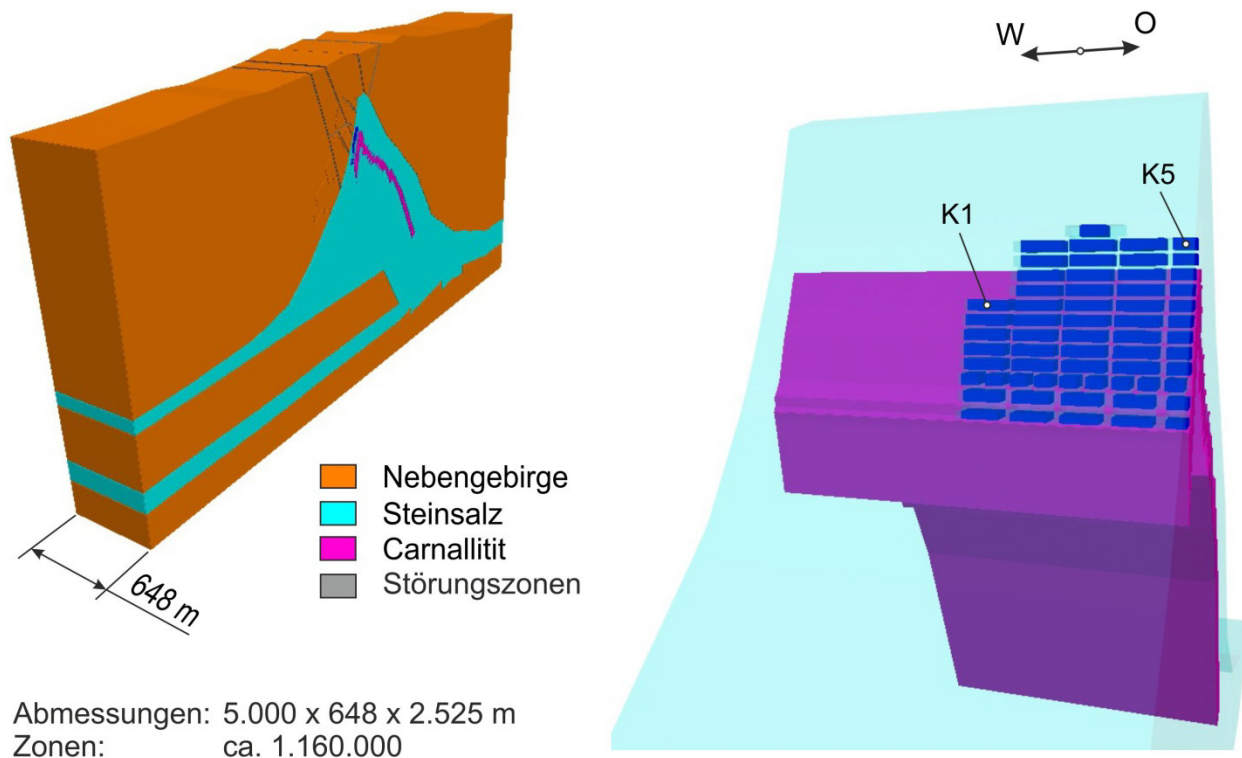


Bild 6.28: Geometrisch-tektonisch vereinfachtes Berechnungsmodell (3D-GTV-Modell)

Die Modellüberlegungen gehen davon aus, dass bestimmte Strukturen, z.B. die Anordnung der Abbaukammern, der Pfeiler und der Schweben in der Südflanke, näherungsweise symmetrisch sind, was die Modellstruktur vereinfacht. Über die streichende Länge von rd. 650 m wird hierbei die geologische Information konstant gehalten; sie beruht im Wesentlichen auf einem zentralen Querschnitt ("Schnitt 2") durch den Asse-Sattel. Diese Symmetrieannahme stellt eine starke Vereinfachung der komplexen geologischen Verhältnisse in dem realen System dar. Die tektonische Gliederung des Deckgebirges wird durch eine ebenfalls vereinfachte Störungszonengeometrie beschrieben.

Durch diese Vorgehensweise (Spiegelung) wurde eine vergleichsweise geringe Modellerstellungszeit erzielt, andererseits ist jedoch dadurch eine für die Durchführung der numerischen Simulationen schwer handhabbare Größe des GTV-Modells mit über 1,1 Mio. Zonen entstanden. Trotz dieser erheblichen Modellgröße sind der Primärspannungszustand und anschließend der Auffahrungsprozess in guter Übereinstimmung zum Q-3D-Modell simuliert worden. Für vertiefte Untersuchungen und Sensitivitätsbetrachtungen ist ein derartiges Modell jedoch durch seine vergleichsweise große Zonenanzahl nicht geeignet.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurde daher festgestellt, dass das 3D-Modell für das Gesamtsystem im Hinblick auf die Zonenanzahl deutlich optimiert werden muss. Es wurde die Entscheidung getroffen, ein Modell mit einer Diskretisierung durch 300.000-400.000 Zonen anzustreben.

6.3 Zusammenfassende Bewertung der bislang erzielten Ergebnisse

Im Rahmen der vorbereitenden Etappe und der Etappe I wurden folgende wesentliche Ergebnisse erzielt:

- Anhand der Voranalyse zum Tragverhalten des realen Systems und entsprechend den formulierten Zielsetzungen wurden die Anforderungen an das aufzubauende idealisierte numerische System aufgestellt.
- Zusätzlich wurden einige Funktionsmodelle aufgebaut und angewendet zur Analyse der Modellierungsfähigkeit einzelner Prozesse sowie zum Verständnisaufbau in Bezug auf das Verhalten des Gesamtsystems.
- Bei der Abbildung des Systemtragverhaltens wurden folgende Hypothesen aufgestellt:
 - Hypothese zur Wirkungsweise der Störungszonen und zur Ausbildung eines Nebengebirgsblocks;
 - Hypothese zur Orientierung der Anisotropie der Materialeigenschaften im Nebengebirge;
 - Hypothese zur Wirkungsweise des Versatzdruckaufbaus in der Restabilisierungsphase;
 - Hypothese zur Ausbildung eines Traggewölbes im Nebengebirge.
- Mit dem aufgebauten Prozess- und Systemverständnis wurde anhand eines Q-3D-Streifenmodells die Re-Analyse der geschichtlichen Entwicklung der Südflanke der Schachtanlage Asse II zur Validierung des numerischen Modells durchgeführt. Eine gute Übereinstimmung der erzielten numerischen Ergebnisse mit charakteristischen In-situ-Messwerten (Pfeilerstauchungsraten) belegt die Plausibilität der angenommenen und numerisch abgebildeten Hauptzusammenhänge.
- Zusätzlich wurde zur Reduzierung der Rechenzeiten die Abbildung der Entfestigungsprozesse so optimiert, dass ein Rechenzeitreduzierungsfaktor von ca. 4-7 erzielt wurde.
- Schließlich wurden anhand eines zusätzlichen speziellen vereinfachten GTV-3D-Modells Untersuchungen durchgeführt, mit deren Hilfe die optimale Modellgröße für das auf der Etappe II aufzubauende 3D-Modell für das Gesamtsystem voreingeschätzt werden konnte.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass auf den Ergebnissen der vorlaufenden Etappen die für den Anfang der Etappe II notwendigen Erkenntnisse aufgebaut werden konnte, sodass nun weitgehend die Voraussetzungen für einen erfolgreichen Aufbau eines möglichst realitätsnahen 3D-Modells für das Gesamtsystem Schachtanlage ASSE II/Südflanke vorliegen.

7 Anwendung des entwickelten Konzeptes am Beispiel der Schachtanlage Asse II/Südflanke – Etappe II: Aufbau eines numerischen Instrumentariums für das Gesamtsystem

7.1 Aufbau des 3D-Basismodells für das Gesamtsystem

7.1.1 Idealisierung der geotektonischen Situation und der Grubengebäude-Geometrie

Im Rahmen der vorbereitenden Arbeiten für die Diskretisierung des 3D-Modells für das Gesamtsystem Asse II/Südflanke sind zunächst einige Vereinfachungen in der in den Voretappen erstellten 3D-Zeichnung des realen Systems (s. Kapitel 6.1.1) bei der Geometrie der untertägigen Strukturen vorgenommen worden, um den Diskretisierungsaufwand und die Anzahl der Diskretisierungselemente des zu erstellenden Modells zu optimieren. Diese Vereinfachungen betreffen das Grubengebäude, die Störungszonen und den Gebirgsaufbau. Sie werden nachstehend erläutert:

(1) Grubengebäude

Bei der Vereinfachung der Geometrie der Hohlräume des Grubengebäudes wurde bezugnehmend auf das Konvergenzverhalten des Grubengebäudes darauf geachtet, dass trotz der konfigurativen Vereinfachungen das Gesamtvolumen der Hohlräume des Modell-Grubengebäudes möglichst angenähert das reale Volumen wiedergibt, *Bild 7.1*. Im Ergebnis wurde in der so vereinfachten 3D-Zeichnung eine vergleichsweise sehr geringe Abweichung zu dem realen Volumen von ca. 2 % erreicht.

In das digitale 3D-Modell sind alle aus dem Risswerk zu entnehmenden Abbaukammern bis zur 775-m-Sohle übernommen worden. Im weiteren Entwicklungsschritt wurden vereinfachend folgende Hohlräume nicht in das Gesamt-3D-Modell übernommen:

- Hohlräume unterhalb der 775-m-Sohle (Tiefenaufschluss) – zum Teil bereits verfüllt und auf das hier relevante großräumige Tragverhalten möglicherweise nur von untergeordneter Bedeutung,
- schacht- und streckenartige Hohlräume oberhalb der 775-m-Sohle (z. B. Tagesschächte Asse 2 und Asse 4 sowie Blindschächte, Begleitstrecken, Querschläge und Wendelstrecke).

Die explizite Berücksichtigung dieser Grubenbaue sowie der schacht- und streckenartigen Hohlräume im Rahmen des hier zu entwickelnden großräumigen 3D-Modells ist aus Kapazitätsgründen (Rechenzeit) zurückgestellt worden.

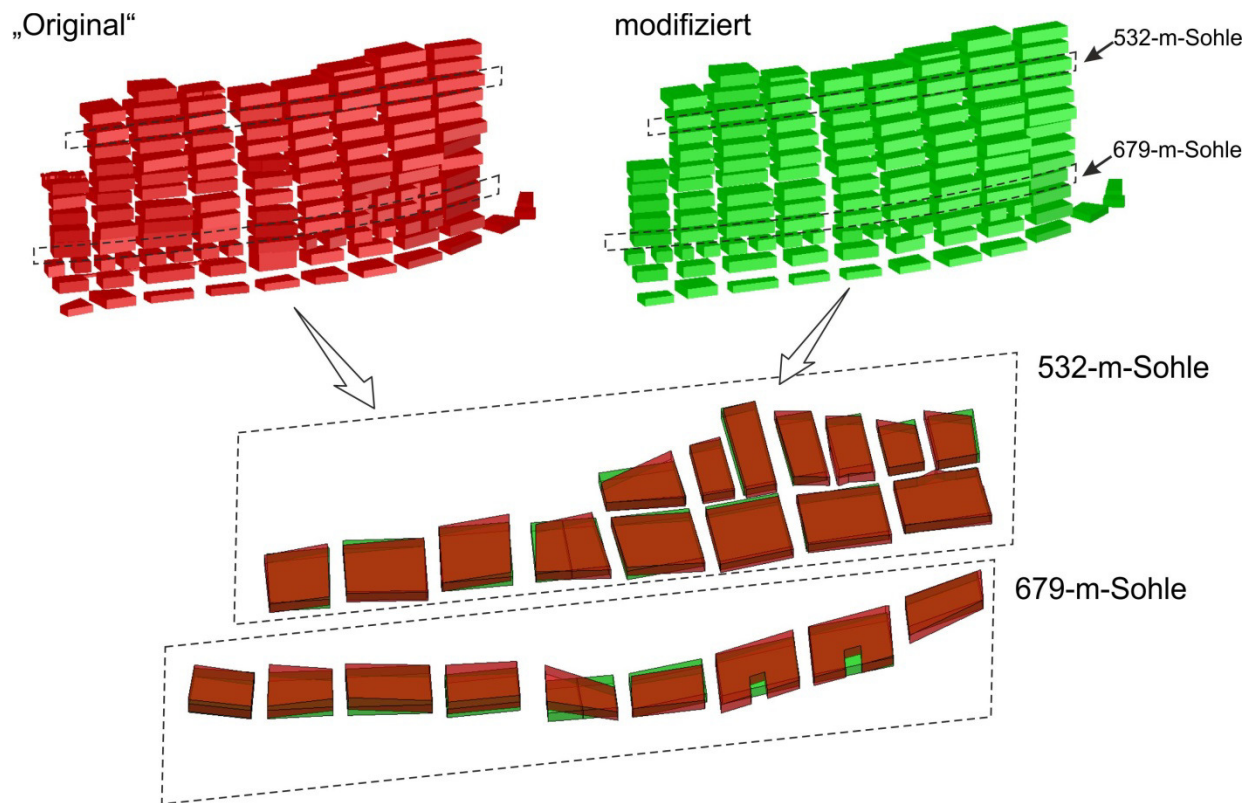


Bild 7.1: Vereinfachungen in der Konfiguration des Grubengebäudes

(2) Störungszonen

Bei den Störungszonen wurde auf die Abbildung eines gebogenen Verlaufes von Störungen aufgrund der unzureichenden Zuverlässigkeit der Informationen zur Lage und zum Verlauf der Störungszonen verzichtet. Weiterhin wurden die Störungszonen vereinfacht mit mindestens 10 m Breite approximiert, da derzeit ohnehin keine gesicherten Informationen über die tatsächliche Breite einer Störungszone vorliegen. In Bild 7.2 sind die Ebenen für die Positionierung der geometrisch vereinfachten Störungszonen dargestellt.

(3) Gebirgsaufbau

Zusätzlich waren in der 3D-Zeichnung Extrapolationen zum Verlauf der Oberfläche des Salzsattels notwendig, da die notwendige Information in Form von geologischen Schnitten für größere Bereiche insbesondere im Fernfeld der Schachtanlage und in den Teufen über 1000 m nicht zur Verfügung stand. Die nach der Extrapolation entstandene Salzoberfläche in der 3D-Zeichnung für den zur Diskretisierung festgelegten Bereich (ca. 5000 m in NS-Richtung, ca. 2000 m in OW-Richtung und ca. 2100 m in die Tiefe) ist in Bild 7.3 zu sehen.

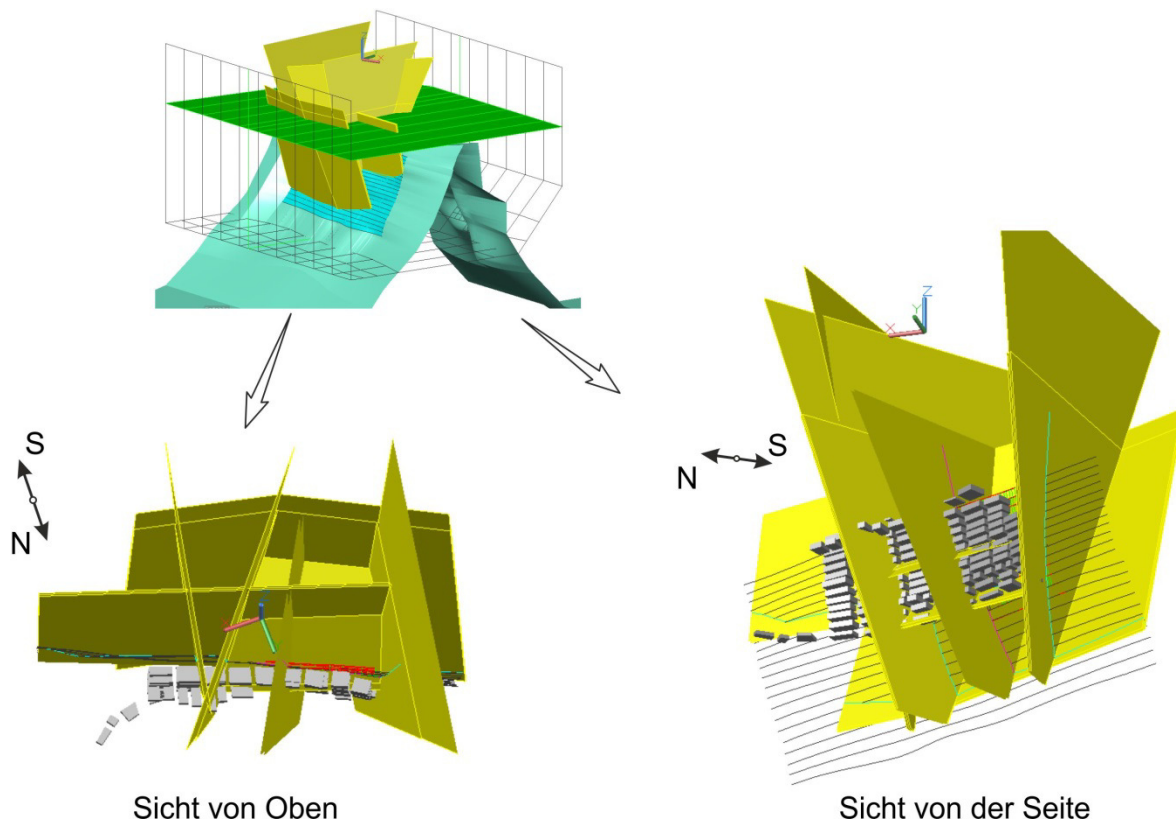


Bild 7.2: Vereinfachungen in der Geometrie der Störungszonen (Ebenen für die Positionierung)

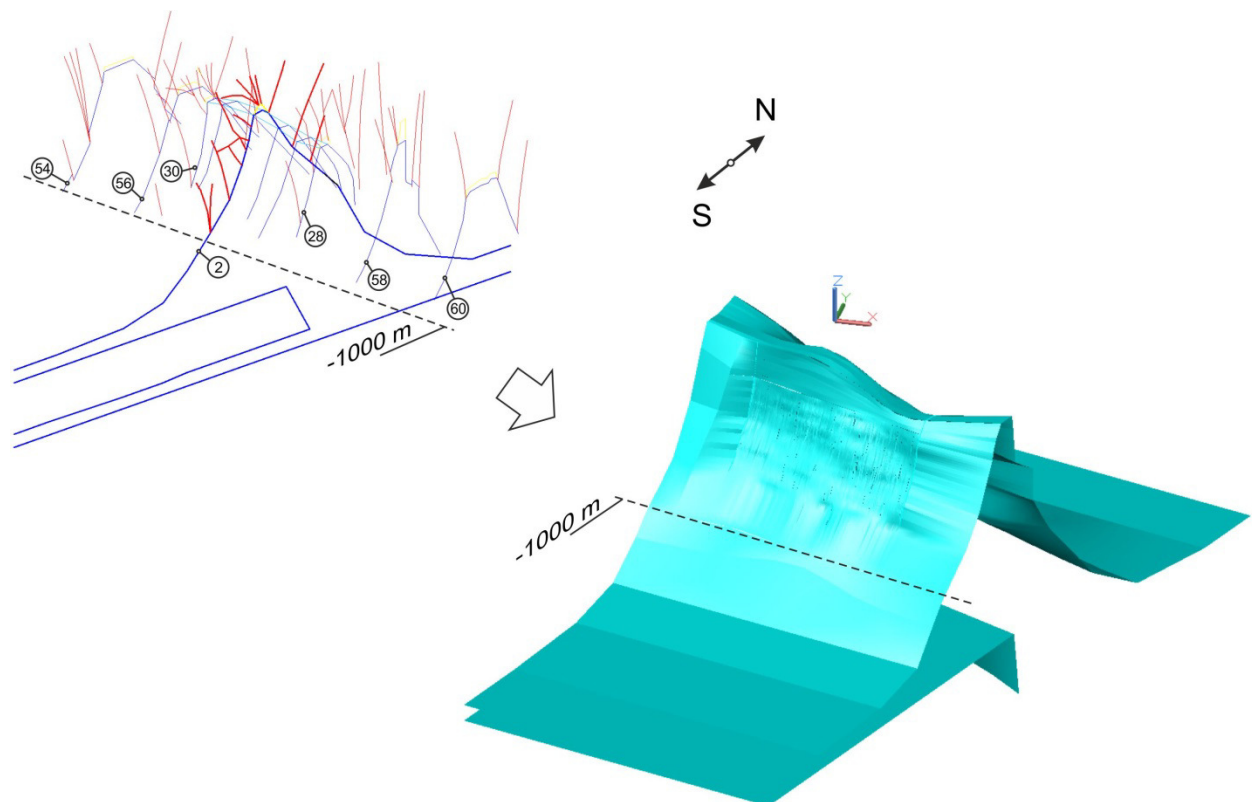


Bild 7.3: Geometrischer Verlauf der Salzoberfläche mit Extrapolation für die Außenbereiche außerhalb der geologischen Schnitte

7.1.2 Definition der Teilmodelle

Im Rahmen der vorbereitenden Arbeiten für die Diskretisierung ist im nächsten Schritt der gesamte zu diskretisierende Modellraum in Teilmodelle untergliedert worden. Dieser wesentliche Schritt dient folgenden Zielen:

- einerseits soll eine ausreichende Flexibilität in der Diskretisierung des Prognosemodells für die Untersuchung unterschiedlicher Fragestellungen gewährleistet sein (→ unterschiedlicher Diskretisierungsgrad einzelner Modellbereiche, Implementierung auch ggfs. nachträglich erst zu späteren Zeitpunkten bei weiteren Fragestellungen) und
- andererseits soll gleichzeitig die Durchführung der numerischen Analysen in einem angemessenen und auch optimierten Zeitrahmen ermöglicht werden (→ kontrollierte/optimierte Rechenzeit mit den einzelnen Modellen).

Die Umsetzung erfolgt derart, dass das zu erstellende Modell zunächst in einige vordefinierte Teilbereichsmodelle untergliedert wird, die dann nahezu unabhängig voneinander der aktuellen Aufgabenstellung entsprechend feiner diskretisiert werden können. In *Bild 7.4* sind die festgelegten Teilmodell-Bereiche zu erkennen, die wie folgt beschrieben werden können:

- Das Teilmodell „Grubengebäude“ beinhaltet das gesamte Baufeld Südflanke mit allen Hohlräumen, mit dem Tragsystem sowie mit dem unmittelbar angrenzenden Steinsalzgebirge.
- Das Teilmodell „Nahbereich“ beinhaltet das Steinsalzgebirge sowie das Carnallitgebirge im Nahfeld des Grubengebäudes in Richtung Sattelkern.
- Das Teilmodell „Störungszonenbereich“ mit einem großräumigen Kluftsystem grenzt in Richtung Südflanke/Nebengebirge an das Teilmodell „Nahbereich“ an.
- Die Teilmodelle „Übergang“ und „Fernbereiche“ beinhalten fernliegende Gebirgsbereiche bis zur Modellgrenze.

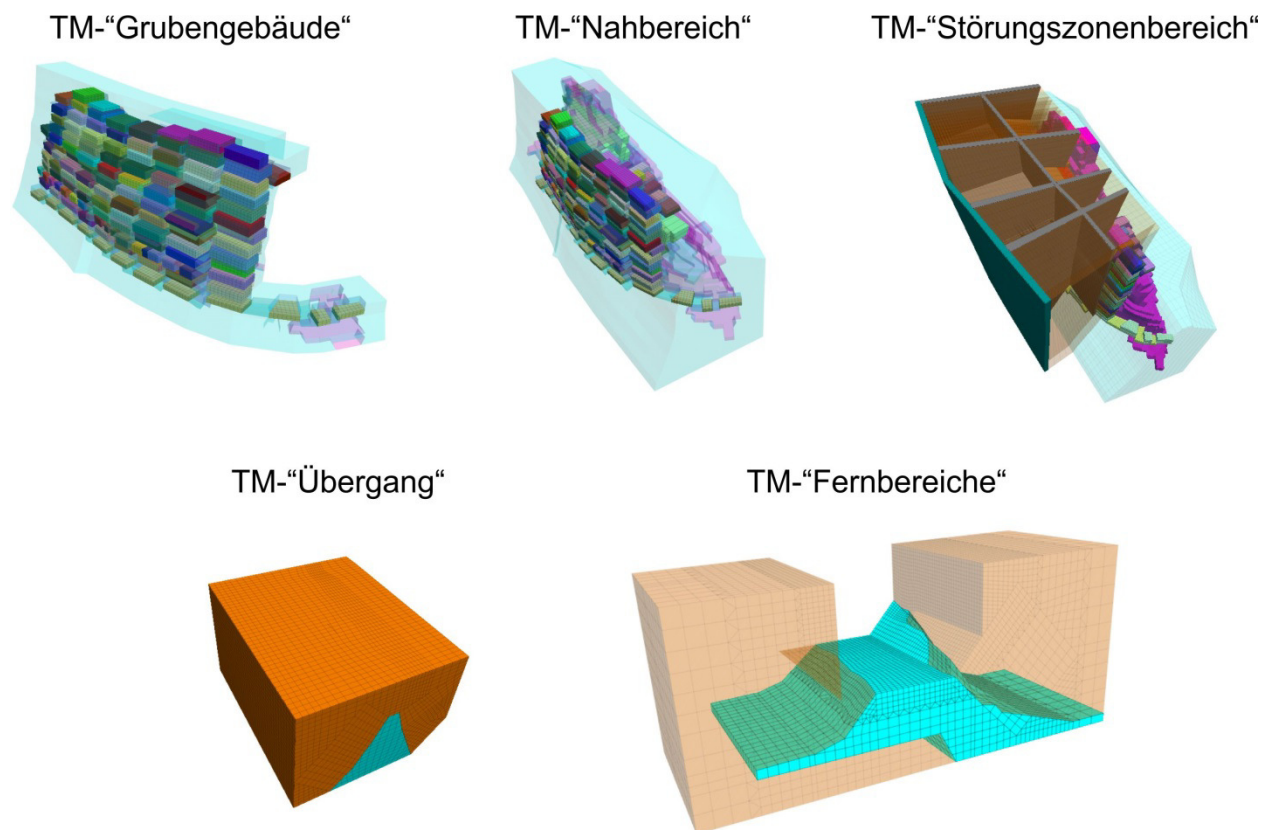


Bild 7.4: Teilmodell-Bereiche im 3D-Berechnungsmodell für die gesamte Südflanke

7.1.3 Einbau einer Variationsmöglichkeit in Bezug auf die Positionierung der Störungszonen

Eine weitere Herausforderung bei der Diskretisierung ist die Berücksichtigung der Störungszonen im Neben- bzw. Deckgebirge.

Zu charakterisieren sind Störungszonen als räumlich begrenzte Gebirgsbereiche mit tektonisch bedingter Entfestigung, in denen die Festigkeit des Gebirges signifikant herabgesetzt ist. Im Modell werden diese strukturellen Elemente als eigene Homogenbereiche berücksichtigt. Die Entfestigung wird dann durch den Ansatz von im Vergleich zum umgebenden Gebirge stark abgeminderten Festigkeitseigenschaften im Homogenbereich der entfestigten Störungszone realisiert (s. Kapitel 5.4). Im diskretisierten Modell sind Abmessungen von unter 10 m nicht mit verhältnismäßigem Aufwand darstellbar, weshalb Störungszonen mit mindestens 10 m Breite approximiert werden müssen. Über die tatsächliche Breite einer Störungszone liegen keine gesicherten Informationen vor.

Im Zuge des Modellaufbaus müssen Lage und Geometrie der Störungszonen in der 3D-Struktur des Teilmodells „Störungszonenbereich“ festgelegt werden. Diese Festlegungen beruhen nach

derzeitigem Kenntnisstand auf dem Risswerk sowie auf Annahmen, Erfahrungswerten und Interpretationen, die aber die tatsächliche Geometrie der Störungen de facto nur als Vermutung beschreiben. In den zugrunde liegenden geologischen Risswerken in Anlehnung an *Wallmüller (2012)* wird zwischen nachgewiesenen, wahrscheinlichen und vermuteten Störungszonen unterschieden, wobei für alle Störungsarten gilt, dass sich die Vorstellung von ihrem Verlauf und ihrer räumlichen Ausdehnung aus der Interpretation bestenfalls punktförmiger Befunde herleitet. Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass sich das Bild von der Störungsgeometrie im Zuge einer detaillierteren Deckgebirgserkundung zukünftig ändern wird. Aus diesem Grund wurde vorausschauend der zu diskretisierende Bereich (Teilmodell „Störungen“) mit einem Variationspotenzial versehen, das eine parallele Verschiebung der Störungszonen ermöglicht. Das folgende Diskretisierungsmuster ist schematisch in *Bild 7.5* dargestellt. In *Bild 7.6* sind einige praktische Realisierungsmöglichkeiten demonstriert.

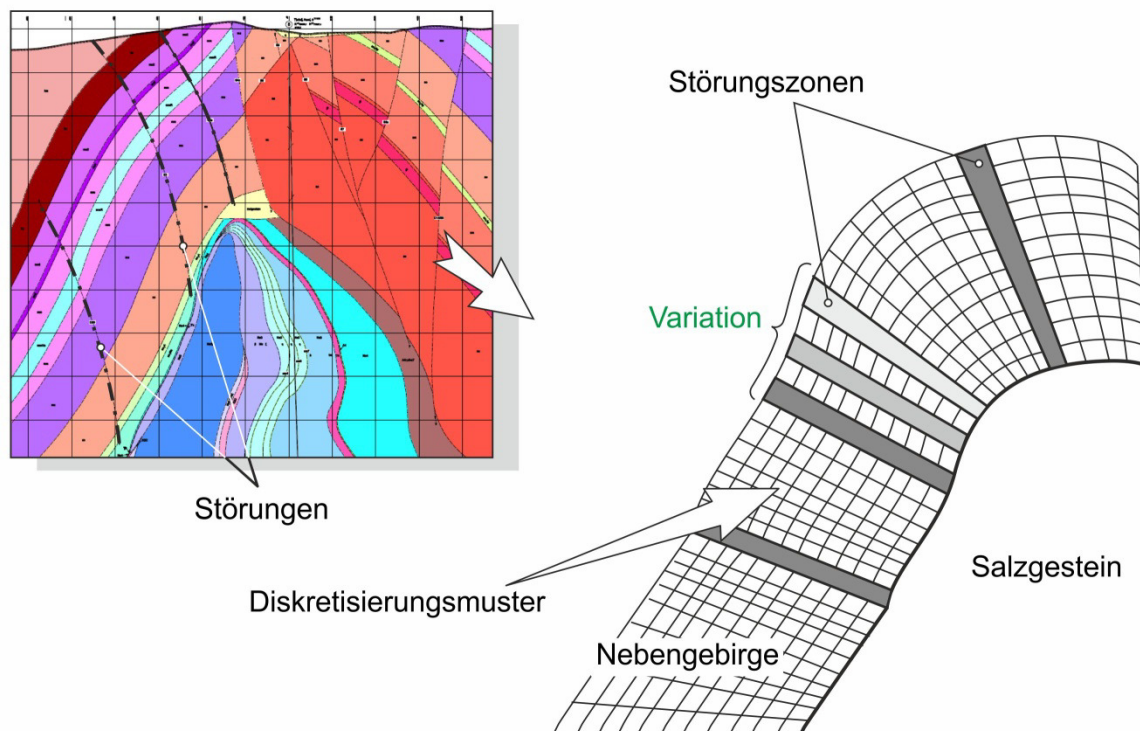


Bild 7.5: Schematische Darstellung der Variationsmöglichkeit in Bezug auf die Lage der Störungszonen

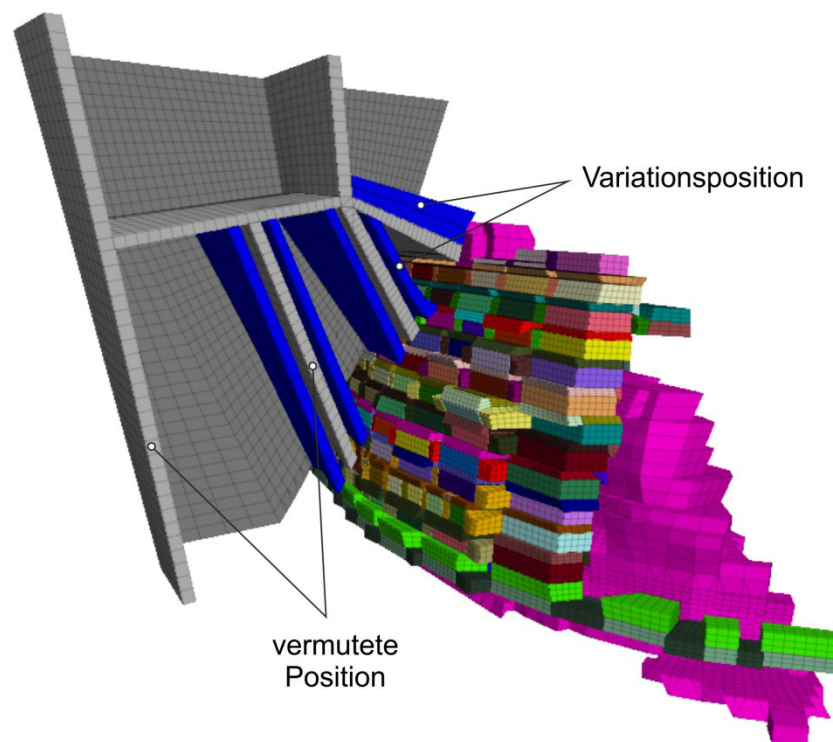


Bild 7.6: Realisierungsmöglichkeiten in Bezug auf die Lage der Störungszonen

7.1.4 Diskretisierung der Teilmodelle und der Übergangsbereiche

Für jedes der Teilmodelle wird in der 3D-Zeichnung eine geeignete Raumaufteilung in die Primitiven/Zerteilungen mit einem für das Basismodell festgelegten optimalen Zerteilungsgrad der jeweiligen Modellbereiche entwickelt. In *Bild 7.7* ist exemplarisch ein Bereich aus dem Teilmodell „Grubengebäude“ für die 532-m-Sohle dargestellt mit der dazugehörigen Zerteilung in die Primitiven sowie mit der festgelegten Anzahl von Elementen entlang jeder charakteristischen Richtung der Zerteilung. Zur anschließenden Übertragung dieser Primitiven/Zerteilungen in den Simulator FLAC3D werden dafür hier in der 3D-Zeichnung alle Zerteilungen mit individuellen Nummern versehen.

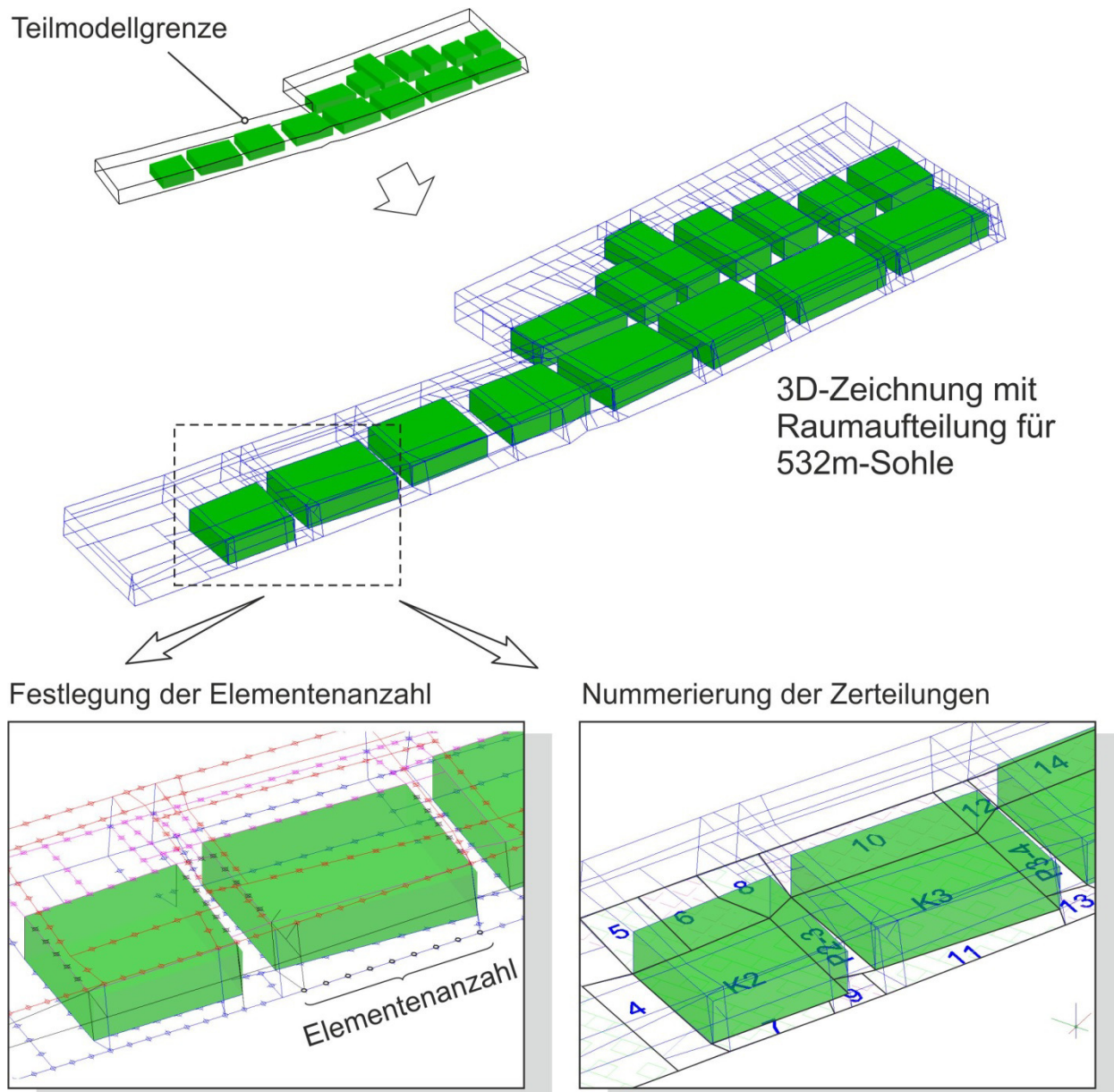


Bild 7.7: Exemplarische Darstellung der Zerteilung in die Primitiven anhand des Bereiches aus dem Teilmodell „Grubengebäude“ für die 532-m-Sohle

Eine besondere Herausforderung bei der Diskretisierung der Teilmodelle besteht darin, die Teilmodelle über ihre Grenzfläche simulationstechnisch optimal ineinander zu überführen und miteinander zu verknüpfen. Hierzu ist eine besondere Vorgehensweise notwendig, weil die Teilmodelle, wie vorstehend beschrieben, unterschiedliche Feinheitsgrade in der Diskretisierung aufweisen. Zusätzlich kann es bei numerischen Variationen notwendig sein, den Feinheitsgrad in der Diskretisierung einzelner Teilmodelle zu ändern. Die Übergangsbereiche zwischen den Teilmodellen gewährleisten dabei, dass bei Modifikation in der Diskretisierung eines

Teilbereichs keine Modifikationen in der Diskretisierung der benachbarten Teilmodelle notwendig sind.

Um Informationen zwischen den Teilmodellen zu transferieren, werden die Teilmodelle über sogenannte "Übergangs"-Elemente verknüpft. Diese "Übergangs"-Elemente sind zwar aufwendiger in der Vorbereitung als die im Software-Code FLAC3D schon zur Verfügung stehenden "Attach"-Elemente, haben sich jedoch in den weiteren numerischen Untersuchungen vor allem in Bezug auf die Stabilität der numerischen Simulationen als günstigere Diskretisierungsform für die Verbindung zwischen den Teilmodellen mit einem deutlich unterschiedlichen Diskretisierungsgrad erwiesen, *Bild 7.8*.

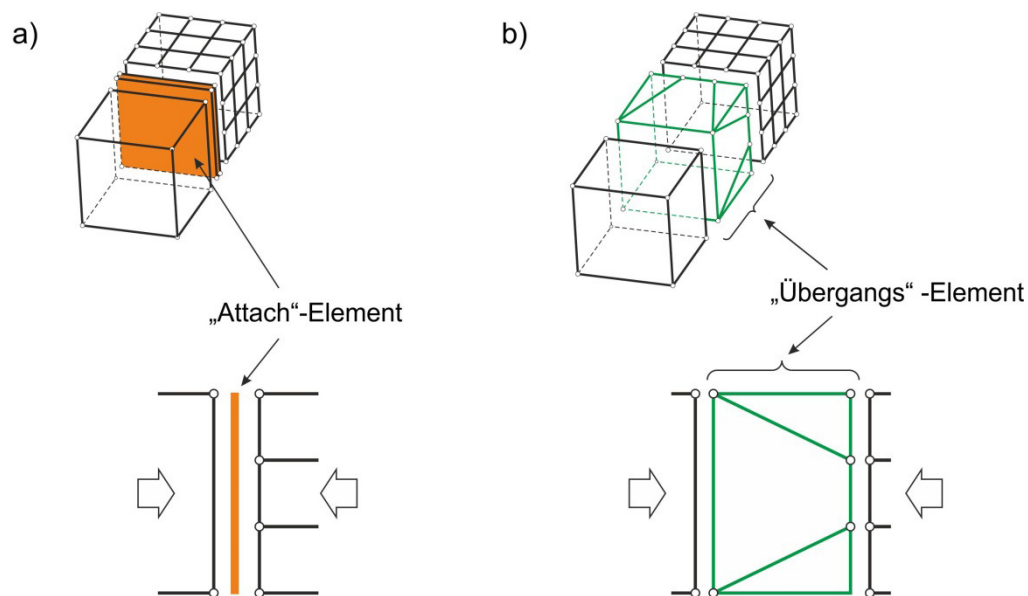


Bild 7.8: Alternative Vorgehensweisen für die Verbindung zwischen den Teilmodellen mit einem unterschiedlichen Diskretisierungsgrad

Zur Realisierung dieser Übergänge sind hier 26 Varianten an „Übergangs“-Elementen entwickelt worden, darunter drei geometrisch unterschiedliche Bausteine, die in unterschiedlicher Lage im Raum platziert werden können, um in Kombination miteinander die Übergänge von feinerer zu gröberer Diskretisierung zu gestalten. Die Übergangselemente selbst bestehen je nach Geometrie aus 9, 12 oder 39 Zonen, *Bild 7.9*.

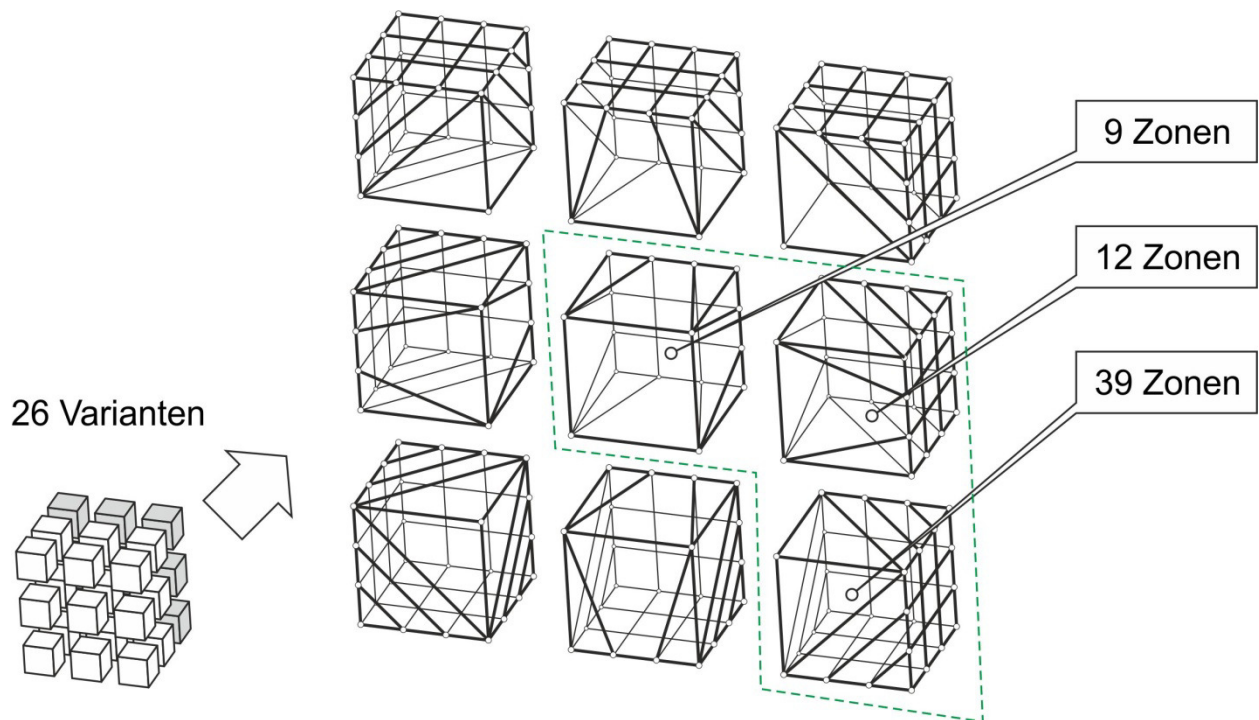


Bild 7.9: Die 26 entwickelten Varianten der „Übergangs“-Elemente

In Bild 7.10 ist exemplarisch die Anwendung dieser „Übergangs“-Elemente in der Nähe der Kammer 9 auf der 490-m-Sohle dargestellt.

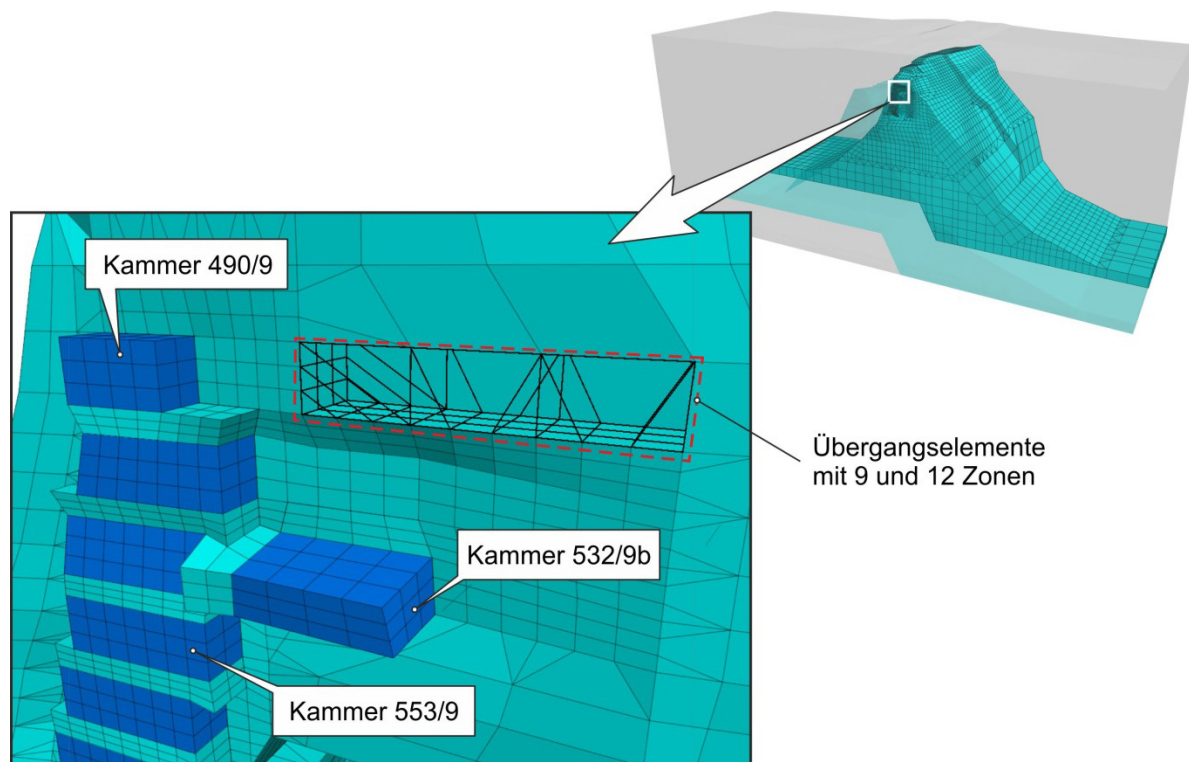


Bild 7.10: Exemplarische Darstellung der Anwendung der „Übergangs“-Elemente in der Nähe der Kammer 9 auf der 490-m-Sohle

Für die eigentliche Erstellung der diskretisierten 3D-Modellstruktur im Simulator FLAC3D aufbauend auf der in AutoCAD erstellten 3D-Zeichnung ist eine aufwendige Überführung der Informationen zur Position und zur Elementenanzahl für mehrere Tausend einzelne Zerteilungen/Primitiven notwendig. Zur Optimierung des Zeitaufwandes bei dieser Überführung wurden über die in AutoCAD implementierte Programmiersprache AutoLISP eigene Routinen entwickelt. Der Ablauf der Übertragung mit der Anwendung dieser Routinen ist schematisch in *Bild 7.11* dargestellt.

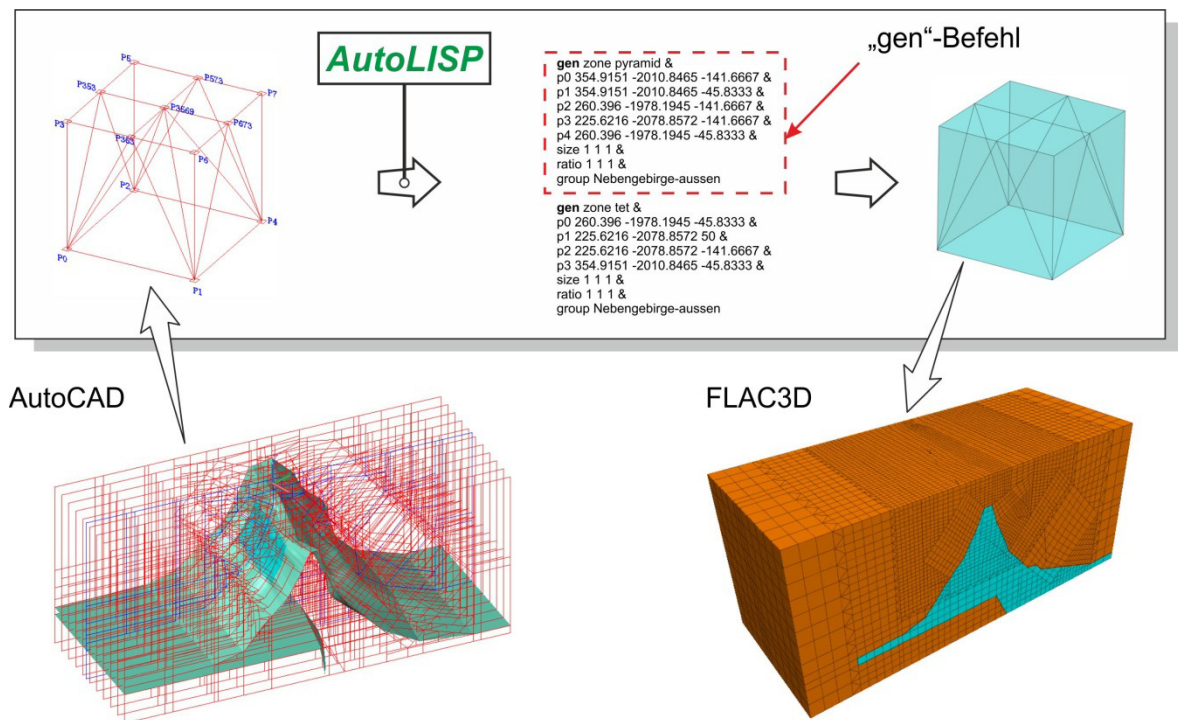


Bild 7.11: Überführung der 3D-Zeichnung (AutoCAD) in eine diskretisierte Struktur (FLAC3D) mit AutoLISP-Routinen

In *Bild 7.12* ist schematisch die Strukturierung der Eingabedateien entsprechend den vordefinierten Teilmodellen dargestellt. Diese Systematisierung der Eingabedateien ist eine Voraussetzung für eine spätere zeitoptimierte gezielte bereichsweise Diskretisierungsänderung im Modell, die in Kapitel 8 noch ausführlich demonstriert wird.

Struktur:

ca. 500 Dateien
ca. 60 Ordner

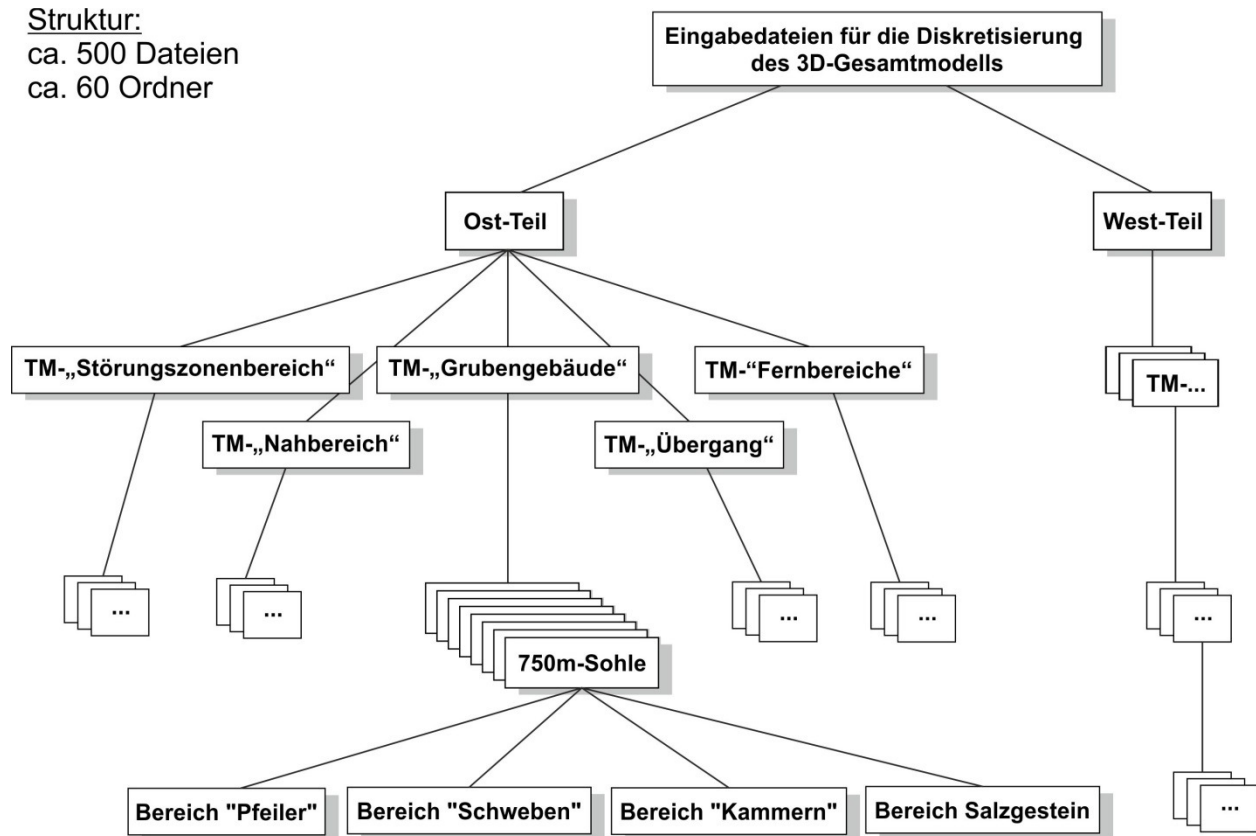


Bild 7.12: Schematische Darstellung zur Strukturierung der Eingabedateien für die Diskretisierung des 3D-Gesamtmodells

7.1.5 3D-Basismodell und erste 3D-Modellreihe

In Bild 7.13 ist das 3D-Basismodell für das Gesamtsystem Asse II/Südflanke dargestellt. Aus dem Bild ist erkennbar, dass das Verhältnis der charakteristischen Zonenabmessung zwischen einer Zone am Modellrand und einer Zone in den filigranen Strukturen etwa einen Faktor 100 aufweist. Dieses Verhältnis entspricht einem Volumenverhältnis von etwa 1 : 1.000.000. Daraus ergibt sich mit ca. 150.000 Zonen eine vergleichsweise hohe Zonenanzahl im Teilmodell „Grubengebäude“ mit den filigranen Strukturen, während beispielsweise für das Teilmodell „Fernbereiche“ mit einem wesentlich größeren Volumen dagegen mit ca. 50.000 Zonen eine vergleichsweise niedrige Zonenanzahl verwendet werden kann. Der aktuelle Feinheitsgrad in der Diskretisierung im Bereich des Tragsystems ist im 3D-Basismodell so festgelegt, dass in Richtung der charakteristischen Dimension (Pfeilerbreite bzw. Schwebendicke) die Diskretisierung durch 3 Zonen realisiert wird. Das gesamte 3D-Basismodell besteht aus ca. 320.000 Zonen.

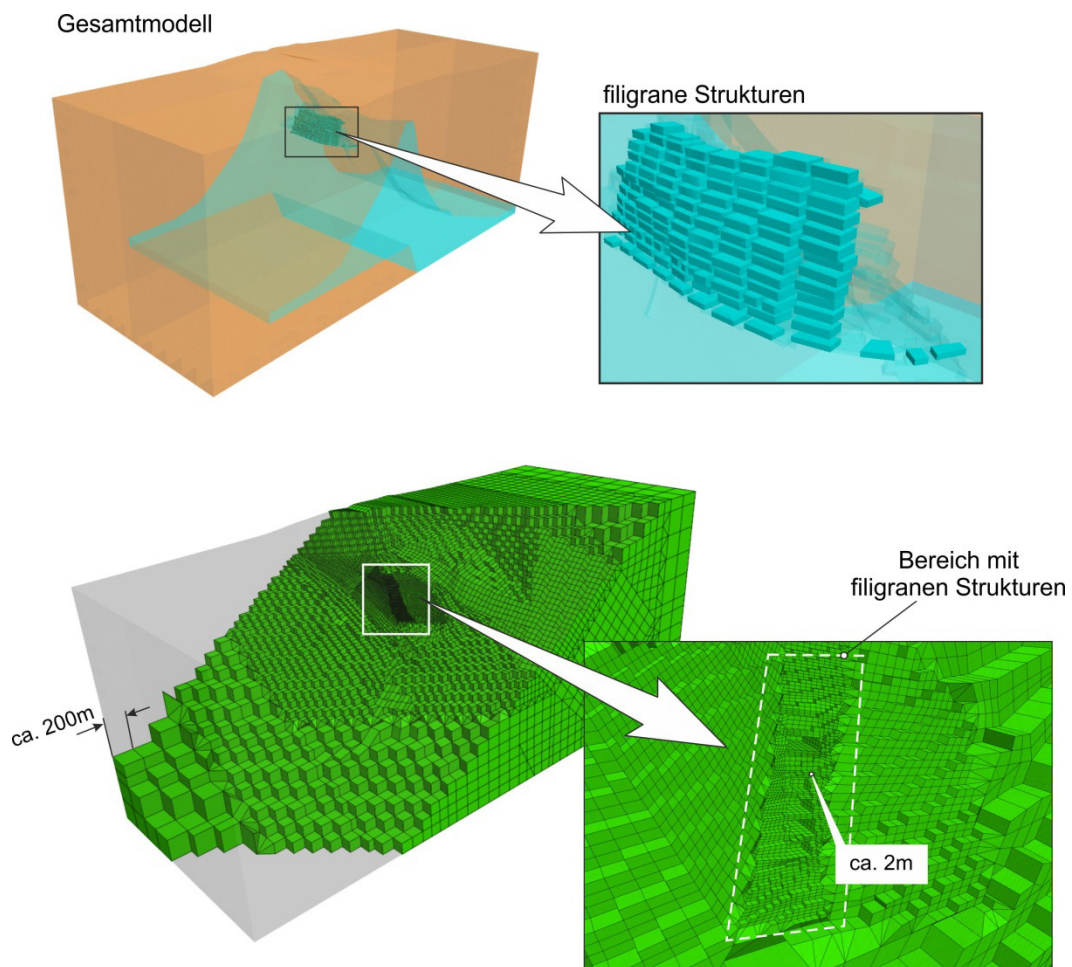


Bild 7.13: 3D-Basismodell für das Gesamtsystem Asse II/Südflanke

Der strukturierte Aufbau des 3D-Basismodells nach dem Teilmodell-Prinzip erlaubt auch die Anwendung der zwei Hauptteile des Modells – West-Teilmodell und Ost-Teilmodell – als unabhängige Berechnungsmodelle. Somit bilden die folgenden drei Berechnungsmodelle die erste erstellte Modellreihe, *Bild 7.14*:

- 3D-Modell für die gesamte Asse-Südflanke (Basismodell),
- 3D-Modell für die halbe Asse-Südflanke Westteil (West-Teilmodell),
- 3D-Modell für die halbe Asse-Südflanke Ostteil (Ost-Teilmodell).

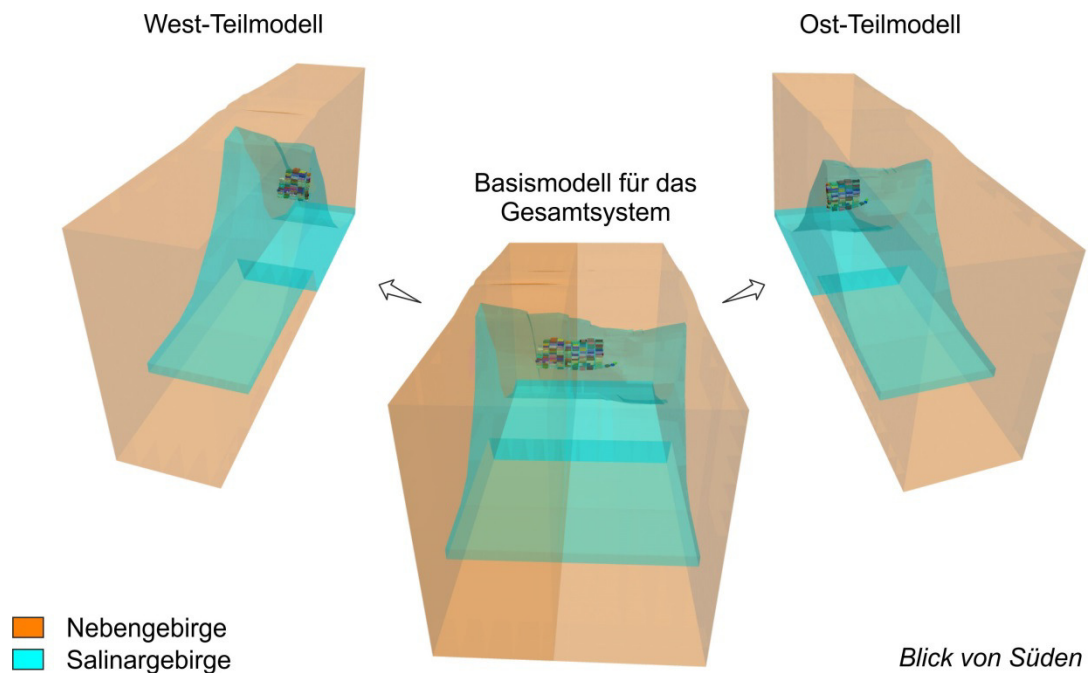


Bild 7.14: Erste Berechnungsmodellreihe mit Modellen für die halbe westliche bzw. für die halbe östliche Asse II/Südflanke sowie für die gesamte Asse II/Südflanke (Basismodell)

Diese ersten 3D-Berechnungsmodelle können als Grundlage zur Entwicklung von allen weiteren zur Bearbeitung von verschiedenen Fragestellungen spezialisierten Berechnungsmodellen herangezogen werden. Die Entwicklung von weiter spezialisierten Berechnungsmodellen erfolgt dann dadurch, dass durch Teilung der in dem jeweiligen 3D-Modell enthaltenen Zonen eine weitere Vertiefung in ihrer Diskretisierung mit einem vergleichsweise geringen Zeitaufwand vorgenommen werden kann, ohne die Grundstruktur zu verändern, z. B. mit einer doppelt oder einer dreifach so feinen Diskretisierung im Bereich des Tragsystems und der Abbaukammern (s. Kapitel 8).

Die entwickelten 3D-Modelle werden nachfolgend für numerische Simulationen zunächst zur Validierung, dann zur Prognose eingesetzt.

7.2 Erste Validierung des 3D-Basismodells durch den Vergleich mit als für das Tragverhalten charakteristisch angesehenen In-situ-Messwerten / Pfeilerstauchungsraten

7.2.1 Vorüberlegungen

Die ersten Validierungen anhand von den 3D-Modellen der ersten Modellreihe für die halbe bzw. die ganze Asse II/Südflanke haben demonstriert, dass die Südflanke bezüglich des Tragverhaltens in lateraler Richtung eher als ein asymmetrisches System zu betrachten ist, vermutlich verursacht insbesondere durch ein asymmetrisches Störungszonensystem im Nebengebirge sowie durch die asymmetrische Positionierung des Hauptpfeilers (20-m-Pfeiler zwischen den Kammerreihen K4 und K5).

In *Bild 7.15* ist die Wirkung der Symmetrierandbedingungen schematisch demonstriert. Bei den numerischen Simulationen mit den 3D-Modellen für die halbe Asse-Südflanke erfolgt die Aufteilung des Gesamtsystems durch Festlegung der entsprechenden Symmetriebedingungen in der Mitte der Kammerreihe 5. Für den Systemaufbau bedeutet dieser Ansatz vor allem, dass mit dem West-Teilmodell bezogen auf das Gesamtsystem ein Tragsystem mit zwei Zentralpfeilern (20 m breit) und mit einer vergleichsweise geringen Anzahl von Vertikalstörungen aufgebaut wird, während dagegen im Ost-Teilmodell ein Tragsystem ganz ohne Zentralpfeiler und mit einer vergleichsweise hohen Anzahl von Vertikalstörungen erhalten wird. Dadurch wird im Vergleich zum Gesamtsystem nach *Bild 7.15b* entweder ein etwa doppelt so steifes numerisches System (West-Teilmodell, *Bild 7.15a*) oder ein etwa nur halb so steifes numerisches System (Ost-Teilmodell, *Bild 7.15c*) erstellt.

Aus dieser Betrachtung kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die zu erwartenden rechnerischen Befunde aus den numerischen Untersuchungen mit den 3D-Modellen für das halbe Tragsystem Asse II/Südflanke unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse nur begrenzte Aussagekraft aufweisen können.

Zur Erzielung einer maximal möglichen Realitätsnähe wird aus diesem Grund und im Rahmen der numerischen Untersuchungen die Validierung mit dem 3D-Gesamtmodell anhand der gesamten zur Verfügung stehenden In-situ-Messdaten für die Pfeilerstauchungsraten vorgenommen.

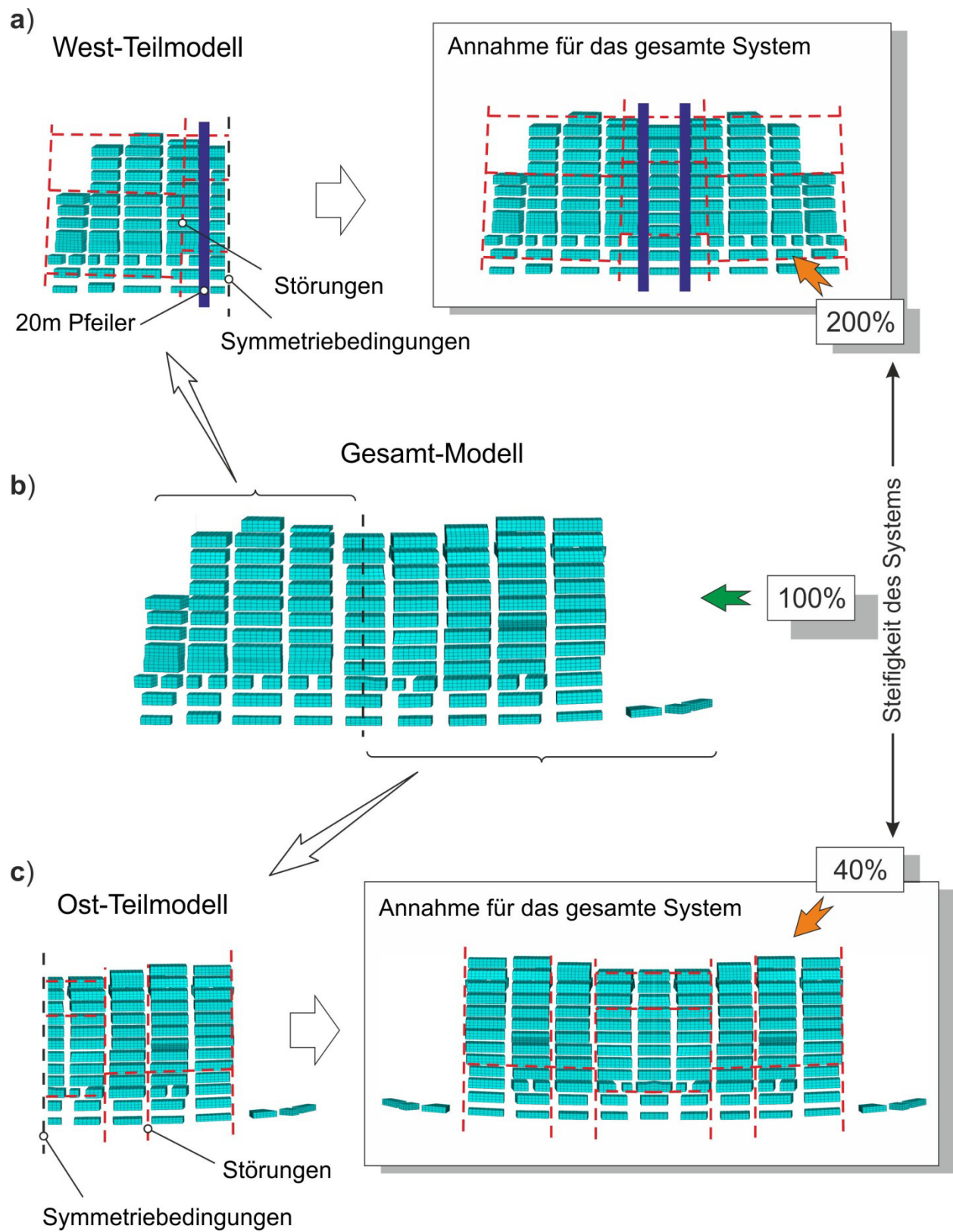


Bild 7.15: Demonstration der Wirkung der Symmetrierandbedingungen in den 3D-Modellen für die jeweils halbe Asse II/Südflanke

7.2.2 Tragverhalten und erster Vergleich

Im Vergleich mit dem Q-3D-36 m-Streifenmodell kann mit dem 3D-Gesamtmodell eine großräumige Lastumlagerung im Nebengebirge nicht nur in vertikaler, sondern auch in lateraler Richtung abgebildet werden. In *Bild 7.16* ist eine flächenhafte Darstellung der maximalen Hauptspannung im Horizontalschnitt in 600 m Teufe im Jahr 2000 zur Demonstration der tatsächlich auch in lateraler Richtung erfolgenden Lastumlagerung exemplarisch abgebildet. Aus diesem Grund wurde in den Validierungsberechnungen die Steifigkeit des Gebirges (Plastizitätsparameter für Homogenbereich Nebengebirge und für Störungszonen) im Vergleich zu den Parametern aus den Validierungsberechnungen mit dem Q-3D-36 m-Streifenmodell abgemindert.

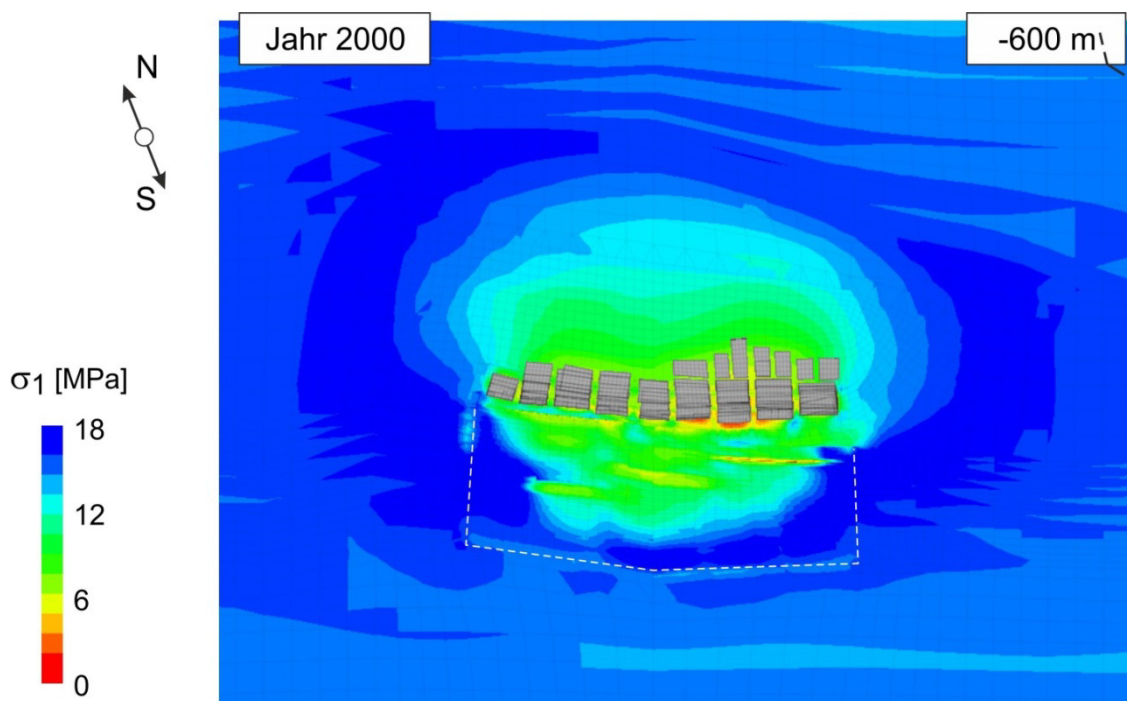


Bild 7.16: Flächenhafte Darstellung der Maximalspannungen im nichtsalinaren Hangend- / Nebengebirge und im Salinargebirge in 600 m Teufe im Jahr 2000

In *Bild 7.17* sind zunächst die Simulationsergebnisse im Vergleich zu dem gesamten Kollektiv an verfügbaren Messwerten zu Pfeilerstauchungsraten dargestellt. Die Pfeilerstauchungsraten werden als diejenigen Messwerte angesehen, die einerseits für das Tragverhalten charakteristisch sind und andererseits zugleich robust ermittelt werden können. Insgesamt ist eine sehr gute Übereinstimmung der numerisch ermittelten Pfeilerstauchungsraten mit den In-situ-Messwerten

zu erkennen – sowohl hinsichtlich des generellen zeitlichen Verlaufs wie auch hinsichtlich der zahlenmäßigen Größenordnung.

Anschließend an die Re-Analyse der Pfeilerstauchungsraten erfolgte dann in einem zweiten Validierungsschritt ein erster ausführlicher Vergleich der Ergebnisse von numerischen Simulationen mit dem 3D-Modell für die gesamte Südflanke mit den weiteren verfügbaren In-situ-Messwerten zum Tragverhalten der AsseII/Südflanke, um zu sehen, ob auch weitere Zustandsgrößen in ähnlich guter Übereinstimmung in den rechnerischen Simulationen im Vergleich zu den Messdaten erhalten werden.

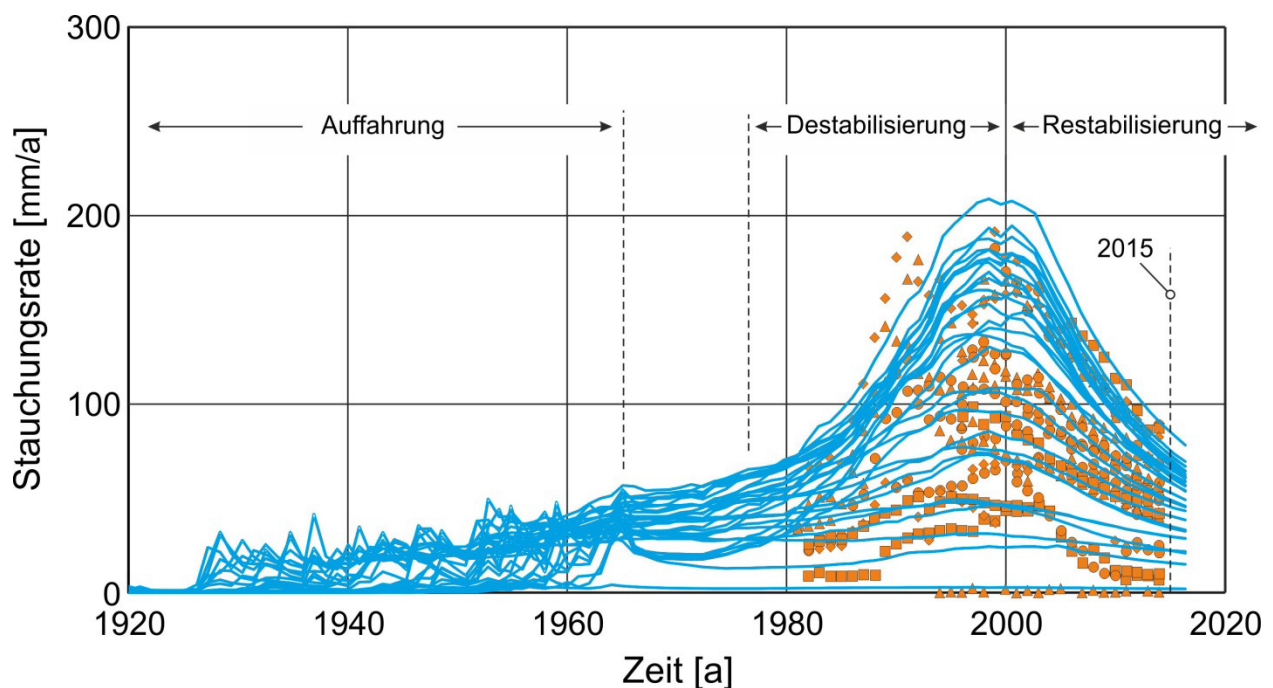


Bild 7.17: Vergleich von numerischen Ergebnissen anhand des 3D-Gesamtmodells mit den In-situ-Messwerten für die Pfeilerstauchungsraten

7.3 Vertiefung der Validierung durch Vergleich der numerischen Ergebnisse anhand des 3D-Gesamtmodells mit weiteren In-situ-Messwerten

7.3.1 Vergleich mit den Pfeilerstauchungsmessungen (horizontale Verschiebungen)

Der Vergleich mit den Pfeilerstauchungsraten für das Gesamtsystem wurde schon vorstehend in Kapitel 7.2 demonstriert, da diese Messwerte als charakteristisch für das Tragverhalten eingestuft und für die Validierung herangezogen wurden. Hier wird nun ein etwas differenzierterer Vergleich der numerisch ermittelten Zahlenwerte mit den Messdaten dadurch vorgenommen, dass das gesamte Datenkollektiv in 4 ortspezifische Gruppen aufgeteilt wird: Westteil oben, Westteil unten, Ostteil oben, Ostteil unten. In *Bild 7.18* und in *Bild 7.19* sind diese vier Datengruppen mit Berechnungs- und Messwerten vergleichend dargestellt.

Diese Bilder zeigen, dass trotz einer guten Übereinstimmung des Datenkollektivs insgesamt der lokale Vergleich für die einzelnen Messpunkte teilweise Überschätzungen bzw. Unterschätzungen in den numerischen Zahlenwerten im Vergleich zu den In-situ-Messwerten feststellen lässt. Diese Unterschiede sind sehr wahrscheinlich mit im numerischen Modell nicht berücksichtigten bekannten und auch unbekannten Effekten mit Auswirkung auf das Tragverhalten lokaler Art zu erklären. Zu derartigen lokalen Effekten gehören z. B. die im Berechnungsmodell nicht berücksichtigten unterschiedlichen Versatzarten oder Störungszonen. Mit der Berücksichtigung dieser lokalen Effekte ist zukünftig eine bessere Übereinstimmung der noch erkennbar abweichenden numerischen Ergebnisse für die einzelnen Messpunkte zu erwarten. Voraussetzung dazu sind insbesondere vertiefte Kenntnisse zu Aufbau, tektonischem Inventar und Materialeigenschaften des Deck- und Nebengebirges.

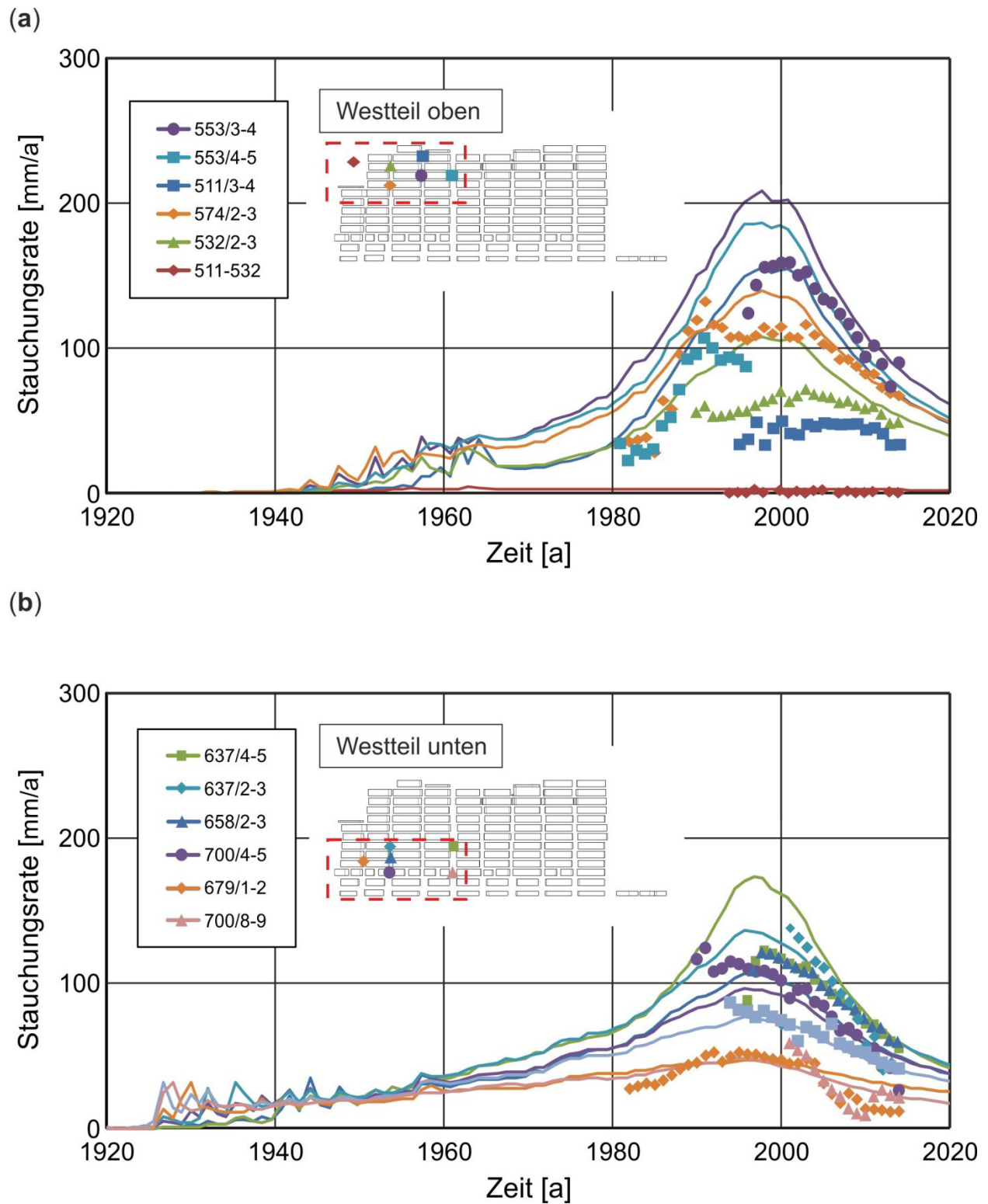


Bild 7.18: Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den In-situ-Messwerten nach ASSE-GmbH (2014a) für die Pfeilerstauchungsraten im westlichen Teil des Grubengebäudes (Kammerreihe 1 bis 5) für die (a) oberen und für die (b) unteren Sohlen

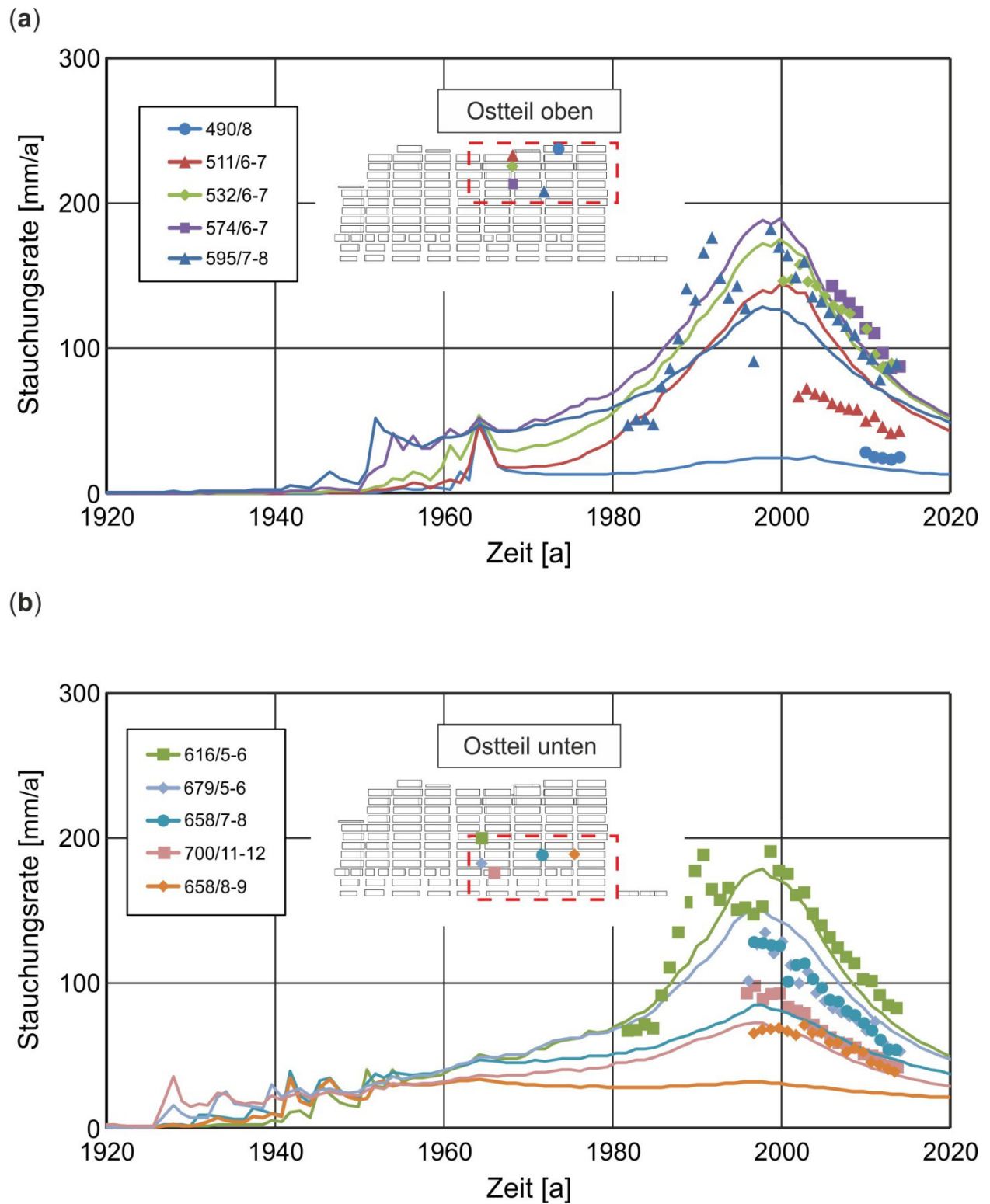


Bild 7.19: Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den In-situ-Messwerten nach ASSE-GmbH (2014a) für die Pfeilerstauchungsraten im östlichen Teil des Grubengebäudes (Kammerreihe 6 bis 9) für die (a) oberen und für die (b) unteren Sohlen

7.3.2 Vergleich mit den Inklinometermessungen (vertikale Verschiebungen)

Inklinometermessungen sind grundsätzlich Messungen in Bohrlöchern, die Auskunft geben über Verschiebungen des Gebirges quer zur Bohrlachse. Im Fall der Asse werden die Inklinometermessungen in horizontalen Bohrlöchern durchgeführt, die in der Mitte von Pfeilern geteuft worden sind. Damit erfassen die Inklinometermessungen die relativen Vertikalbewegungen entlang der Bohrlöcher in den Pfeilern in Süd-Nord-Richtung. Exemplarisch ist in *Bild 7.20* eine typische Vertikalbewegungsmessung für den Pfeiler zwischen den Kammern 12 und 13 auf der 700-m-Sohle für verschiedene Zeitpunkte dargestellt zusammen mit einer schematischen Skizze zum prinzipiellen Verlauf der ermittelten Messwerte.

Zur Ableitung der großräumigen relativen vertikalen Verschiebungen zwischen Nord- und Südstoß der Südflanke werden diese Inklinometermessungen nachfolgend interpretiert: aus den Messkurven wird jeweils die Differenz zwischen dem Nullpunkt und dem maximalen Wert ermittelt. Diesen Differenzen werden dann die entsprechenden numerisch ermittelten Werte jeweils für jede Messstelle in der zeitlichen Entwicklung gegenübergestellt, *Bild 7.21*.

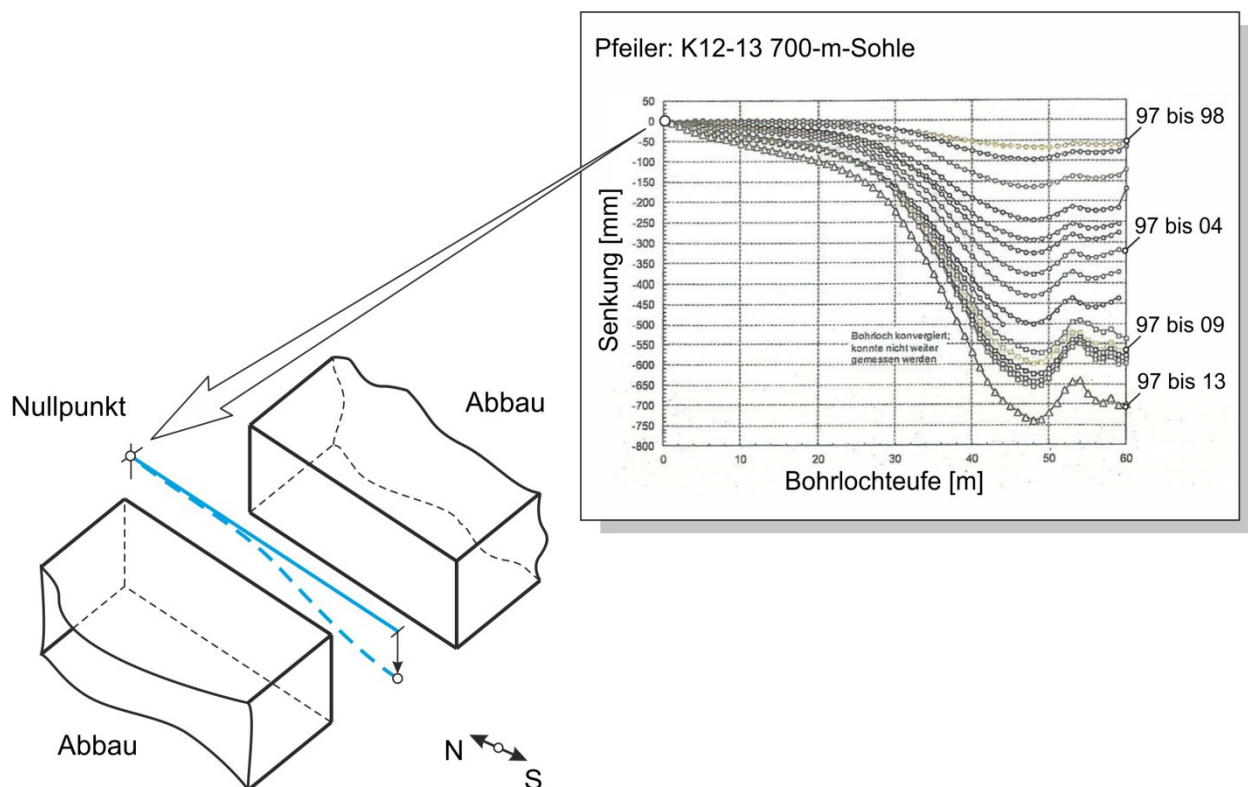


Bild 7.20: Exemplarische Vertikalbewegungsmessung für einen Pfeiler und schematische Darstellung zur Orientierung der Messwerte nach ASSE-GmbH (2014b)

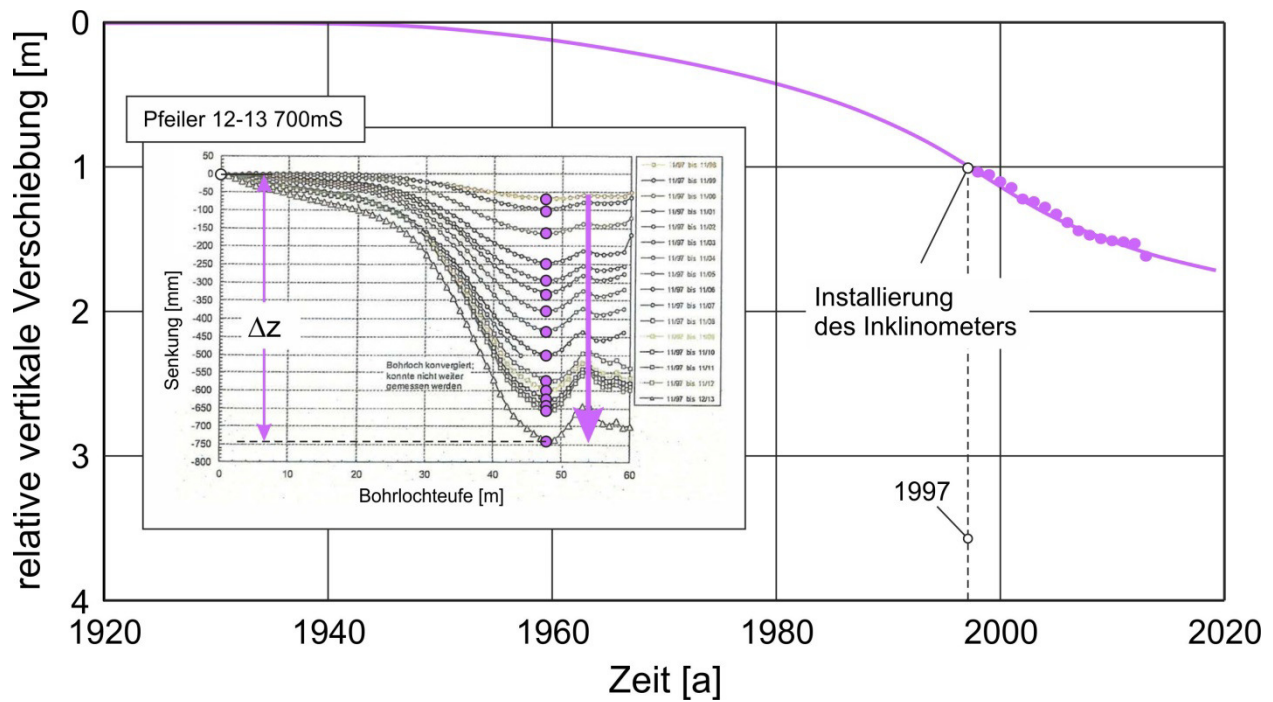


Bild 7.21: Auswertung von Inklinometermessungen für die Ermittlung relativer vertikaler Verschiebungen in der Asse II/Südflanke und Vergleich mit den numerischen Ergebnissen

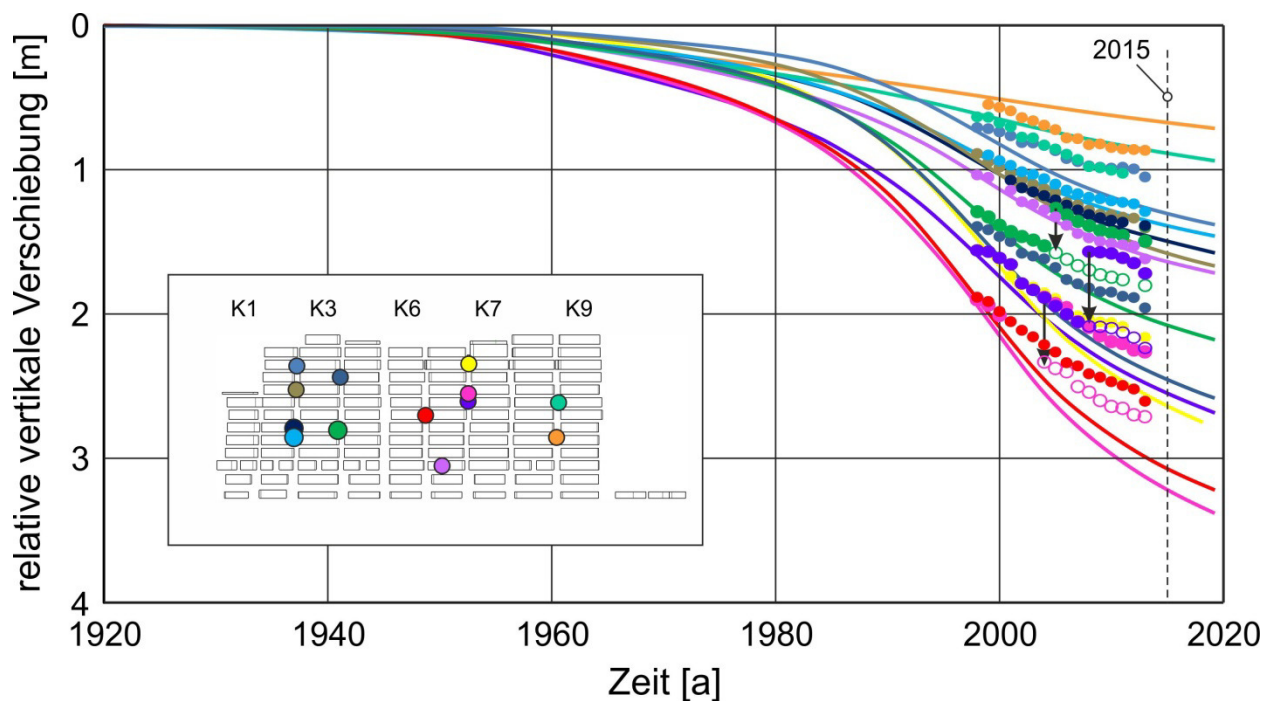


Bild 7.22: Rechnerisch ermittelte relative vertikale Verschiebungen in der Asse II/Südflanke im Vergleich mit den In-situ-Messwerten, abgeleitet aus ASSE-GmbH (2014b)

Auf diese Art ist ein erster Vergleich der rechnerisch ermittelten Vertikalverschiebungen mit den zugehörigen In-situ-Messwerten für die Messstellen der Asse II/Südflanke durchgeführt worden. Aus *Bild 7.22* ist zwar insgesamt eine gute Übereinstimmung festzustellen, im lokationsspezifischen Vergleich ist jedoch eine zum Teil deutliche Überschätzung bzw. Unterschätzung für die einzelnen Kurvenverläufe erkennbar. Vermutlich sind diese Unterschiede verursacht durch die derzeit noch existierenden zahlreichen Imponderabilien bei der Erfassung der Gebirgsstruktur (vor allem der Störungszonenlage) und der Gebirgseigenschaften in den numerischen Simulationen. Damit zeigt sich auch hier wie schon bei den Pfeilerstauchungsraten bei einem Übergang auf eine lokale Betrachtungsebene ein weiterer Präzisionsbedarf bezüglich der Eingangsdaten (geologische Struktur, Materialeigenschaften).

7.3.3 Vergleich mit den Verschiebungen von markscheiderischen Festpunkten

Im Grubengebäude sind an unterschiedlichen Positionen Messpunkte angeordnet, an denen die absoluten räumlichen Verschiebungen gemessen und in Form von Verschiebungsvektoren dargestellt werden. Die zahlreichen Festpunkte sind an verschiedenen Stellen in Strecken verteilt angeordnet. Da diese Messwerte im Gegensatz zu den relativen Werten aus den Pfeilerstauchungsmessungen und den Inklinometermessungen Informationen zu den absoluten Verschiebungen liefern, erlauben sie eine differenzierte Analyse der Gebirgsverschiebungen aus dem Nordstoß (Salzgebirge) und aus dem Südstoß (Nebengebirge) und ihres Verhältnisses.

Die Messdaten sind dabei überwiegend für die horizontalen Komponenten für den Messzeitraum von 1981 bis 2007 vorhanden. Für die vertikalen Verschiebungskomponenten stehen dagegen nur einzelne Messwerte für einige Jahre zur Verfügung, *ASSE-GmbH (2011a)*. Aus diesem Grund wurde ein ausführlicher Vergleich nur mit den horizontalen Verschiebungskomponenten durchgeführt.

In *Bild 7.23* ist exemplarisch ein Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den gesamten vorhandenen In-situ-Messwerten für die 553-m-Sohle dargestellt. Die Gebirgsverschiebungen in der Nordrichtung sind dabei im Maßstab 1:5 aufgetragen, weil das Verhältnis zwischen den Verschiebungen aus der Nordrichtung und aus der Südrichtung in etwa einen Faktor von 9 aufweist. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass dieses zunächst nicht zu erwartende und daher als untypisch anzusehende Verhältnis auch in den numerischen Simulationen wiedergegeben wird. Daraus kann dann aber wiederum die Schlussfolgerung gezogen werden, dass mit dem Simulationsmodell wesentliche Charakteristika des Tragsystems zutreffend erfasst werden.

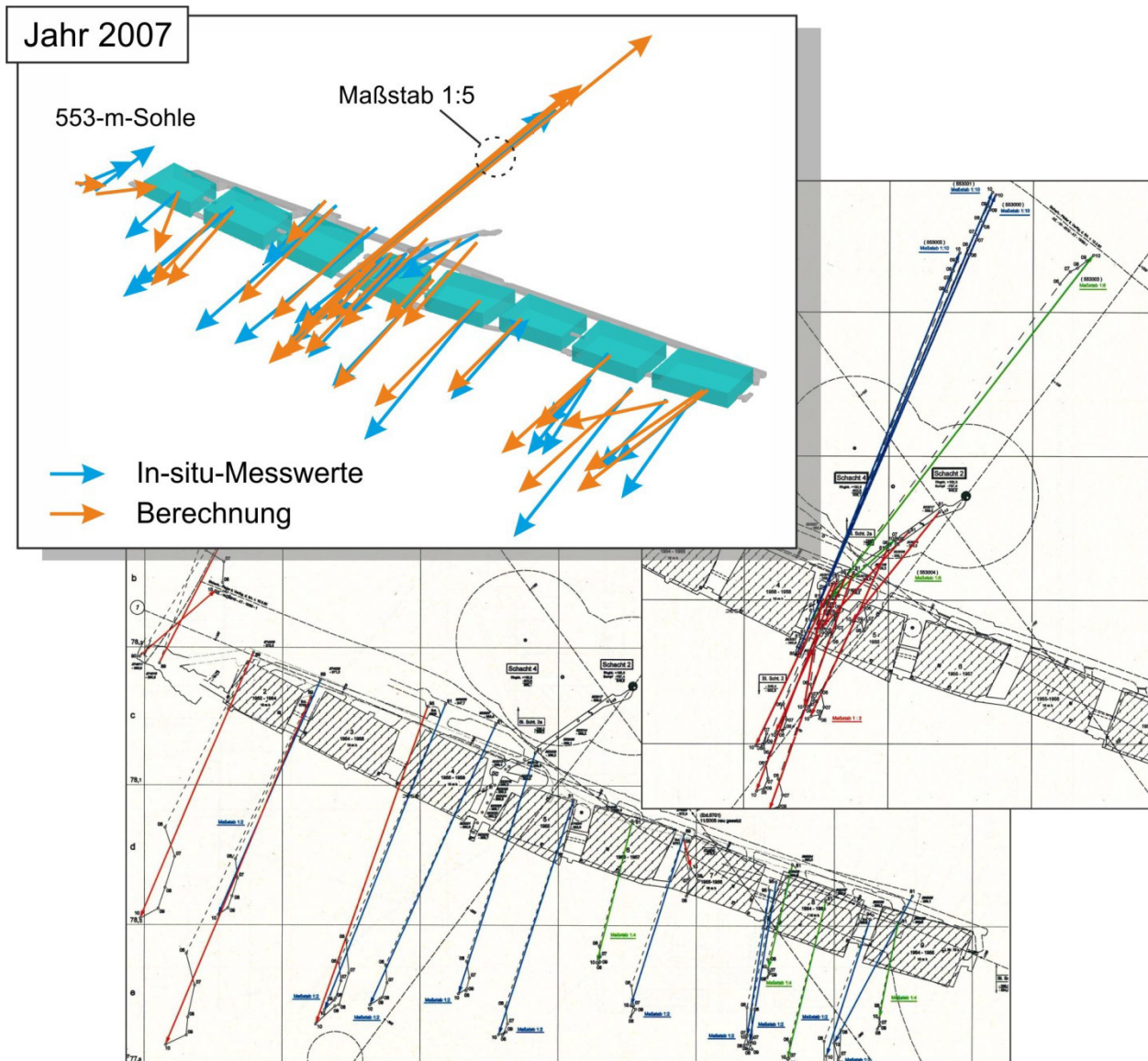
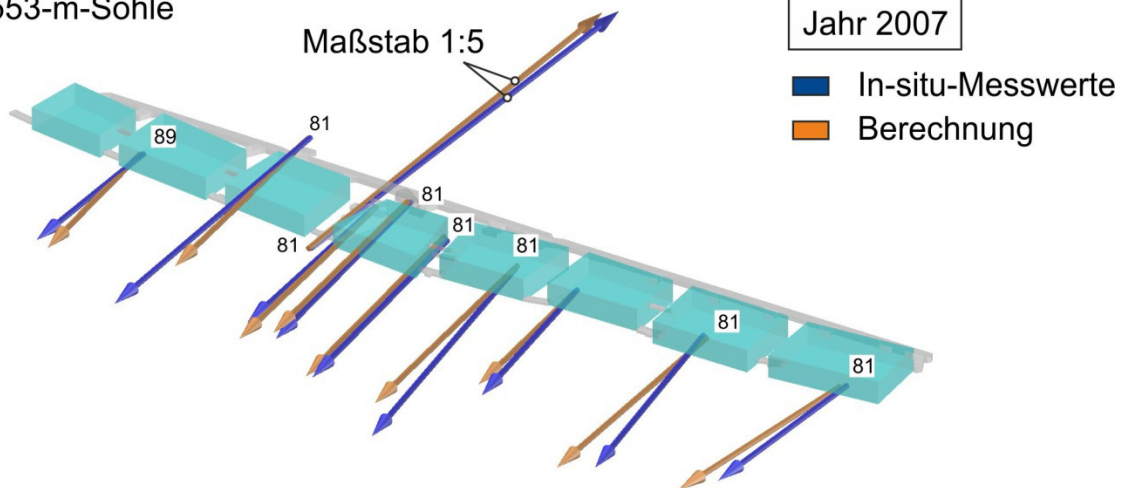


Bild 7.23: Vergleich der rechnerisch ermittelten Verschiebungsvektoren mit den In-situ-Messwerten für die 553-m-Sohle, Messwerte abgeleitet aus ASSE-GmbH (2011a)

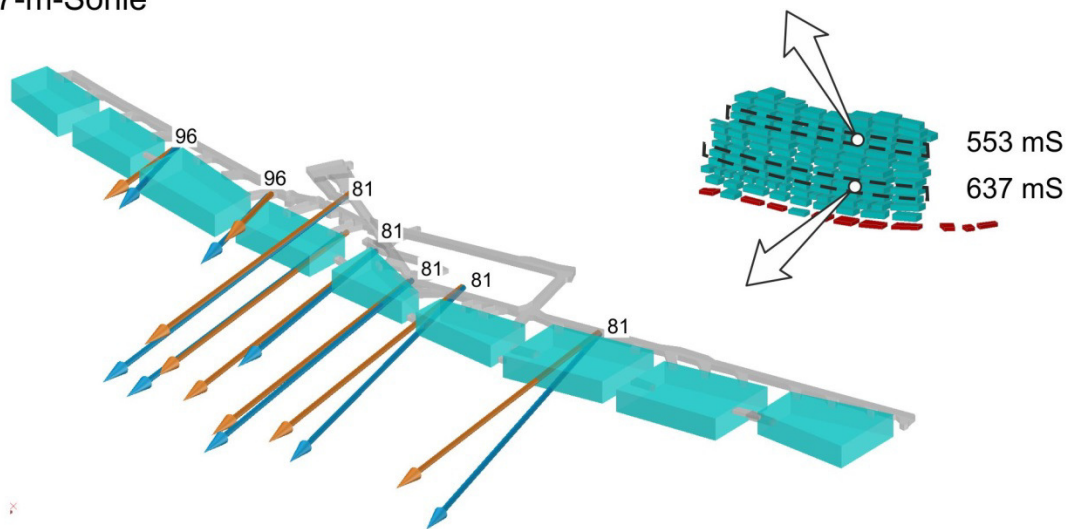
Zu einer weiteren Analyse der Bewegungen des Nordstoßes und des Südstoßes wurde der Vergleich in einem nächsten Schritt auf die Festpunkte in der unmittelbaren Nähe des jeweiligen Stoßes begrenzt. In *Bild 7.24* ist dieser Vergleich exemplarisch für die 553-m-Sohle, die 637-m-Sohle sowie die 775-m-Sohle dargestellt.

Die 553-m-Sohle ist als charakterisierend für die obere Hälfte der Asse II/Südflanke zum Vergleich ausgesucht worden. Hier ist eine sehr gute Übereinstimmung der numerisch ermittelten Ergebnisse mit den In-situ-Messwerten sowohl bezüglich Richtung wie auch bezüglich Betrag erkennbar.

a) 553-m-Sohle



b) 637-m-Sohle



c) 775-m-Sohle

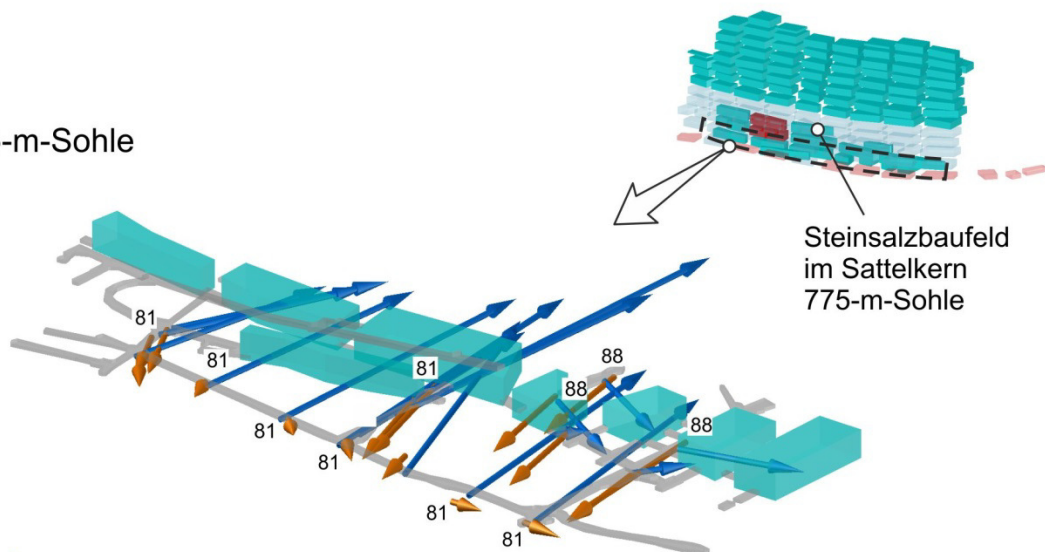


Bild 7.24: Exemplarischer Vergleich der rechnerisch ermittelten Verschiebungsvektoren mit den In-situ-Messwerten bis zum Jahr 2007, Messwerte abgeleitet aus ASSE-GmbH (2011a)

In der die untere Hälfte der Südflanke charakterisierenden 637-m-Sohle ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung bezüglich Richtung und Betrag vorhanden. In der 775-m-Sohle unmittelbar unterhalb der Einlagerungssohle im Bereich der Asse I/Südflanke weichen die Simulationsergebnisse dagegen stark von den Messwerten ab. Diese Abweichung ist offenbar damit zu erklären, dass in den numerischen Simulationen das Baufeld im Sattelnkern noch nicht berücksichtigt wurde und somit die Wirkung der Konvergenz dieses Baufeldes mit dem Modell noch nicht erfasst werden kann.

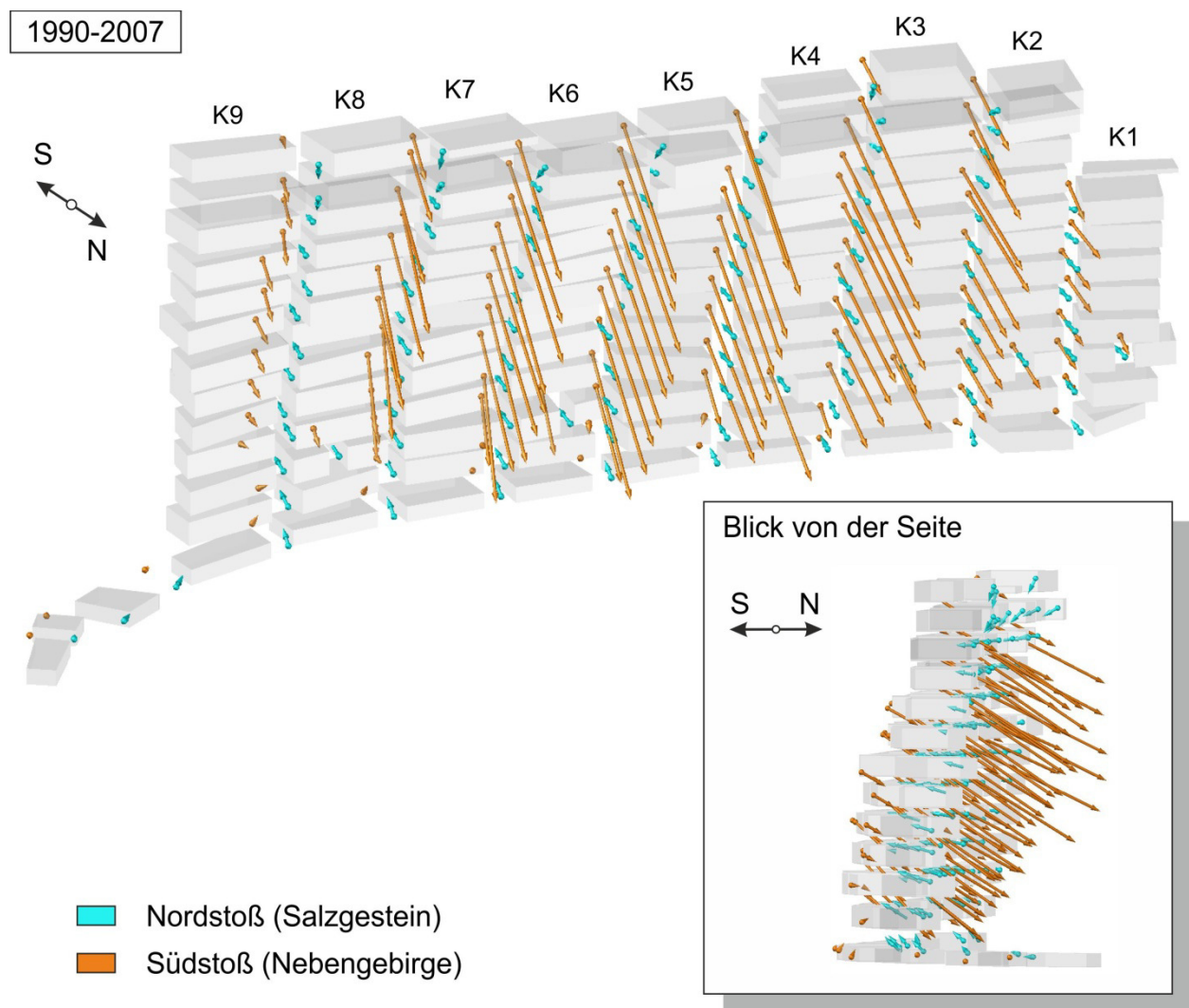


Bild 7.25: Rechnerisch ermittelte Verschiebungsvektoren für den Nordstoß und für den Asse II/Südstoß für den Zeitraum 1990-2007

Anschließend ist dann aus den numerischen Ergebnissen eine systematische Auswertung der gesamten Verschiebungen für die Stirnflächen der Pfeiler für den Zeitraum 1990 bis 2007 zur Analyse der globalen Verschiebungen durchgeführt worden, *Bild 7.25*. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass global die Gebirgsverschiebungen des Asse II/Südstoßes vergleichsweise homogen verteilt sind und im Vergleich zu den Bewegungen aus dem Nordstoß dominieren. Es ist zudem erkennbar, dass die rechnerisch ermittelten Deformationen auf der Seite des Nebengebirges (Südstoß) neben der horizontalen Komponente auch durch eine ausgeprägte vertikale Komponente gezeichnet sind.

7.3.4 Vergleich mit den Oberflächenabsenkungs-Messungen

Seit dem Jahr 1986 werden die Senkungen an der Tagesoberfläche über der Schachtanlage Asse II messtechnisch beobachtet. Aus diesen Messungen ergibt sich der zeitliche Verlauf der Entwicklung der Senkungsmulde. Die Gegenüberstellung der numerisch ermittelten Ergebnisse mit diesen Messwerten ist in *Bild 7.26* in Form einer flächenhaften Darstellung der Senkungen für den Zeitraum 1986-2010 abgebildet. Zu erkennen ist dabei eine qualitative Ähnlichkeit der flächenhaften Ausbildung der Senkungsmulde. Gleichzeitig zeigen sich jedoch auch wesentliche quantitative Unterschiede. Diese Unterschiede werden noch offensichtlicher bei einem Vergleich anhand der Vertikalschnitte 1 und 2 entsprechend Schnittrichtungen längs bzw. quer zur Asse II/Südflanke, *Bild 7.27*. Während die Lage des Senkungsmaximums in etwa übereinstimmt, sind die tatsächlichen Senkungen deutlich größer als die rechnerisch ermittelten Senkungen. Die gemessenen Senkungen sind dabei um einen Faktor von bis zu 4 größer als rechnerisch ermittelt.

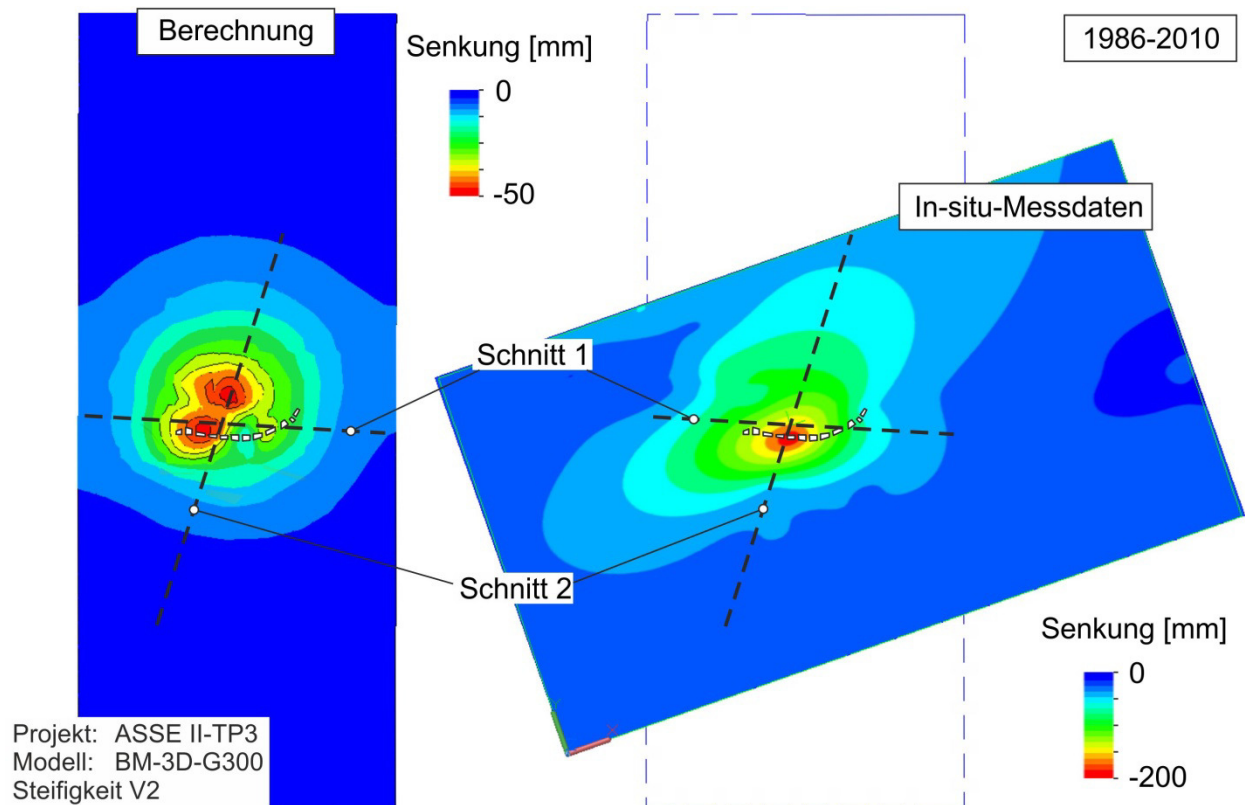


Bild 7.26: Vergleich der rechnerisch ermittelten Oberflächenabsenkungen mit den In-situ-Messwerten für den Zeitraum 1986-2010, Messwerte abgeleitet aus ASSE-GmbH (2011a)

Zur weiteren Analyse dieses Befundes ist eine Auswertung für die zeitliche Entwicklung der numerisch ermittelten Volumina der Senkungsmulde im Vergleich zum Konvergenzvolumen untertage vorgenommen worden. Zusätzlich zum Vergleich wurde eine eigene vorläufige Interpretation/Extrapolation der Messwerte anhand von Rohdaten aus ASSE-GmbH (2011b) zur Ableitung der zeitlichen Entwicklung für das Volumen der in situ vorhandenen Oberflächenabsenkungsmulde durchgeführt, Bild 7.28. Aus dem Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Volumina zeigt sich, dass das numerisch ermittelte Volumen der Oberflächenabsenkungen nur ca. 15 % des untertägigen Konvergenzvolumens der Abbaukammern der Südflanke beträgt. Dabei anzumerken ist, dass auch das aus den Messwerten abgeleitete Oberflächenabsenkungsvolumen (im Gegensatz zu den Rechenwerten verursacht durch alle Abbaufelder) nur ca. 40 % beträgt im Vergleich mit dem rechnerisch ermittelten untertägigen Konvergenzvolumen (nur Abbaufeld Südflanke).

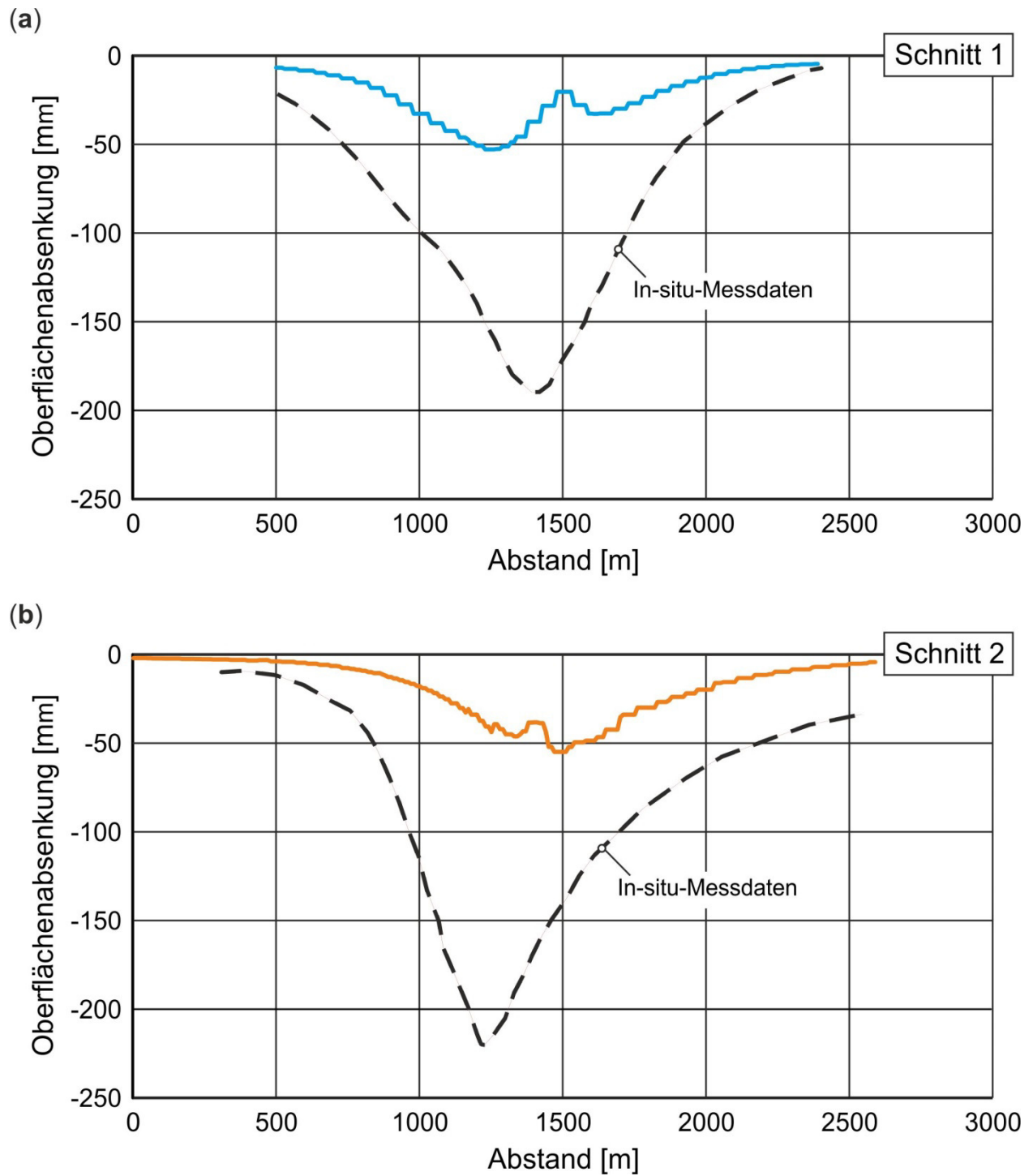


Bild 7.27: Vergleich der rechnerisch ermittelten Oberflächenabsenkungen mit den In-situ-Messwerten für den Zeitraum 1986-2010 im Schnitt 1 (a) und im Schnitt 2 (b)

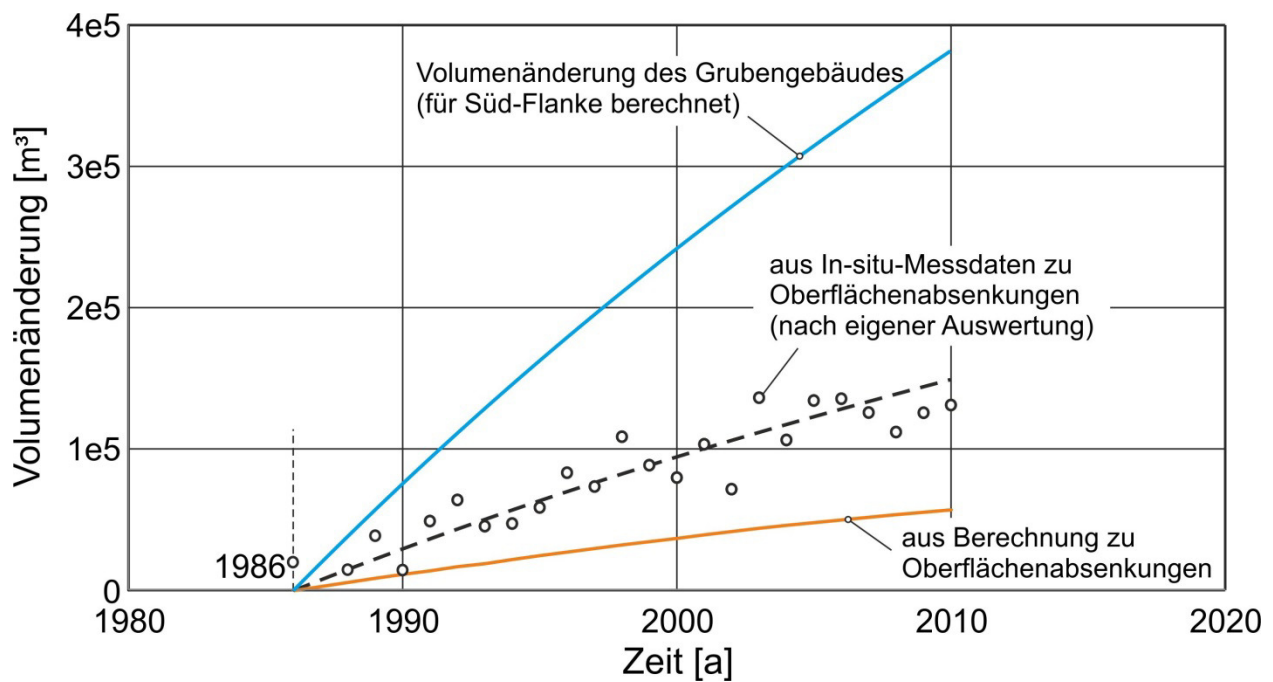


Bild 7.28: Zeitliche Entwicklung der Oberflächenabsenkungsvolumina aus In-situ-Messwerten und aus numerischen Simulationen im Vergleich zum rechnerisch ermittelten Konvergenzvolumen Untertage, Messwerte abgeleitet aus ASSE-GmbH (2011b)

Im numerisch simulierten Tragsystem liegt die Ursache für einen derart beachtlichen Unterschied zwischen dem untertägigen Konvergenzvolumen und dem Oberflächenabsenkungsvolumen in einer ausgeprägten Auflockerung im nichtsalinaren Gebirge (Ansatz einer assoziierten plastischen Potenzialfunktion). Zu einer differenzierten Nachverfolgung der Verbreitung der Wirkung der Konvergenzvolumenentwicklung wurden die Volumenänderungen für einzelne relevante Gebirgsbereiche für den betrachteten Zeitraum ausgewertet und in *Bild 7.29* dargestellt. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass die Auflockerung des Gebirges mit der im Vergleich vom Betrag größten Volumenveränderung im Bereich der Störungszonen stattfindet. Dieses Ergebnis ist mit der Ausbildung von durch die Störungszonen begrenzten Gebirgsblöcken und einer ausgeprägten Bewegung dieser Gebirgsblöcke entlang der Störungszonen infolge einer Festigkeitsüberschreitung zu interpretieren. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass gerade die diese Prozesse beeinflussenden Materialeigenschaften des nichtsalinaren Deck- und Nebengebirges und vor allem der Störungszonenbereiche mit starken Ungewissheiten behaftet sind und somit als eine der größten Imponderabilien im Gesamtsystem einzustufen sind.

Weitere Verbesserungsmöglichkeiten zu einer realitätsnäheren Erfassung der Oberflächenabsenkungen in den numerischen Simulationen bestehen somit einerseits in der

Präzisierung der Materialparameter des nischsalinaren Deck- und Nebengebirges und andererseits in der Berücksichtigung der aktuell noch nicht im Modell implementierten Baufelder (Carnallititbaufeld und Baufeld im Sattelkern).

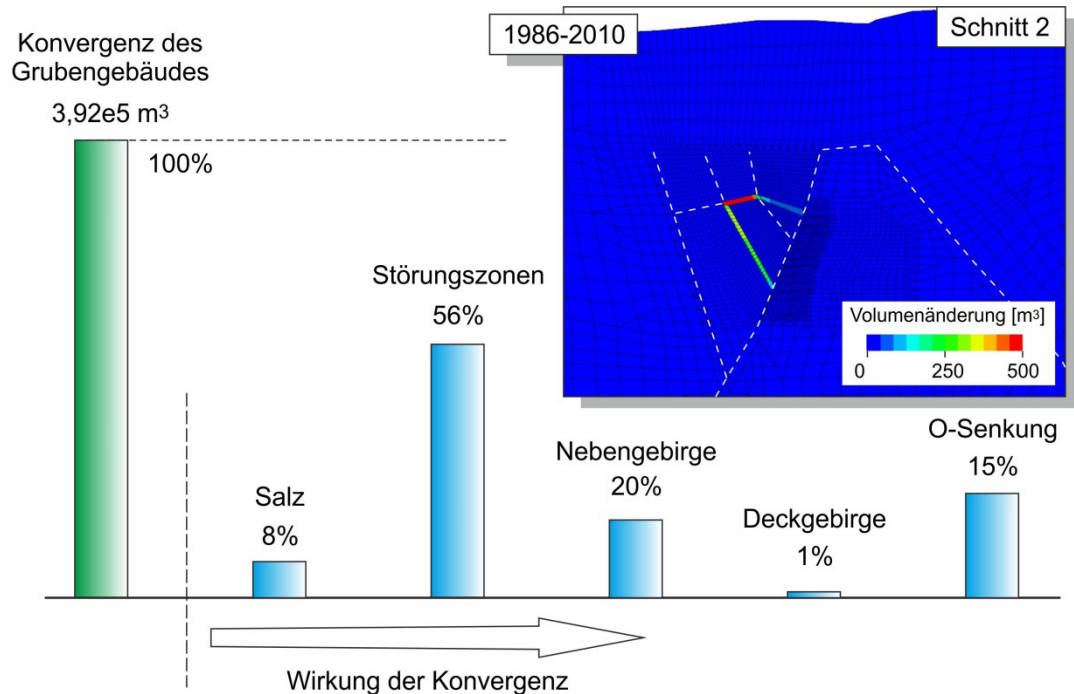


Bild 7.29: Volumenänderungen für einzelne relevante Gebirgsbereiche für den Zeitraum 1986-2010 infolge der Konvergenzvolumenentwicklung in der Asse II/Südflanke

7.3.5 Vergleich mit den Volumenänderungs-Messungen in den Einlagerungskammern

Für die Einlagerungskammern sind die Volumina zum Einlagerungszeitpunkt der Abfälle und zum Zeitpunkt der Kammerauffahrung ermittelt worden. Aus dem Vergleich der Volumina ergibt sich die Kammerkonvergenz für diesen Zeitraum. Der Vergleich der numerisch ermittelten Ergebnisse mit diesen Messwerten wurde für die Einlagerungskammern auf der 750-m-Sohle durchgeführt und in Bild 7.30 in Form des zum Zeitpunkt der Abfallablagerung noch vorhandenen Volumens für jede Einlagerungskammer zusammenfassend dargestellt. Es ist insgesamt eine vergleichsweise gute Übereinstimmung zu erkennen.

Allerdings ist anzumerken, dass die Volumenänderungs-Messungen in der geschichtlichen Entwicklung des Grubengebäudes den Offenhaltungs-Zeitraum vor Beginn der beschleunigten Entfestigungsphase erfassen und damit diese Phase im Gegensatz zu allen anderen zum Vergleich herangezogenen Messdaten nicht in diesen Messdaten erhalten ist.

Eine weitere Verbesserung der Übereinstimmung zwischen Mess- und Berechnungsdaten wäre somit vor allem durch die Präzisierung der Kriecheigenschaften des Salinargebirges zu erreichen, insbesondere durch die zukünftig vorgesehene Einbeziehung der neuen Erkenntnisse aus laborativen Untersuchungen zu den lokationsspezifischen Materialparametern. Eine weitere Verbesserung wäre durch die Diskretisierungs-Verfeinerung des aktuell noch vergleichsweise grob diskretisierten Einlagerungskammer-Bereichs zu erwarten.

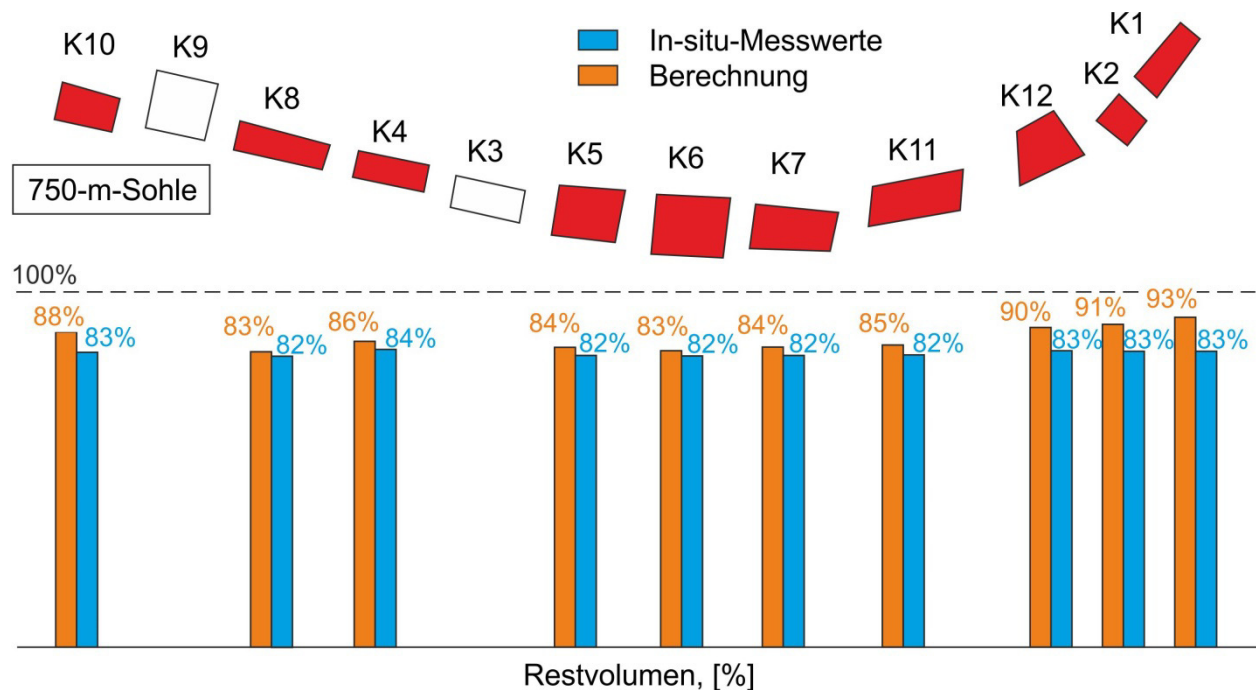


Bild 7.30: Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den In-situ-Messwerten nach GSF (2007) für die Volumenänderung der Einlagerungskammern auf der 750-m-Sohle

7.3.6 Vergleich mit den Spannungsmessungen

Für die Beobachtung von Beanspruchungszuständen im Tragsystem in der Asse II/Südflanke sind seit Ende 90-er Jahre zahlreiche Messstationen für die Ermittlung der Gebirgsspannungen in den Pfeilern installiert. In *Bild 7.31* ist die räumliche Verteilung der Spannungsmessstationen dargestellt. Da die genauen Positionen entlang der Pfeiler nicht bekannt waren, wurden diese hier entsprechend dem Bild vermutet und für den Vergleich angenommen.

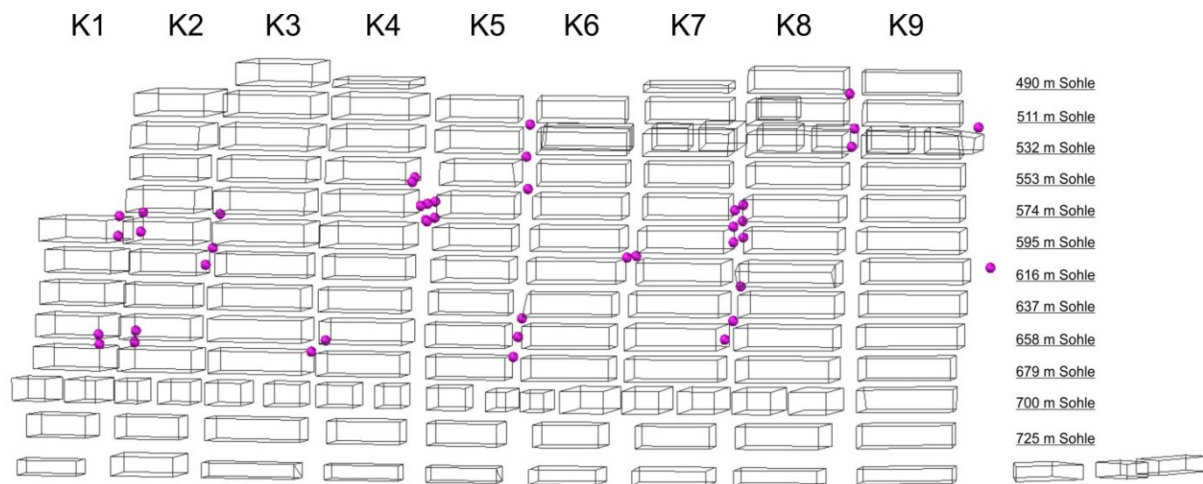
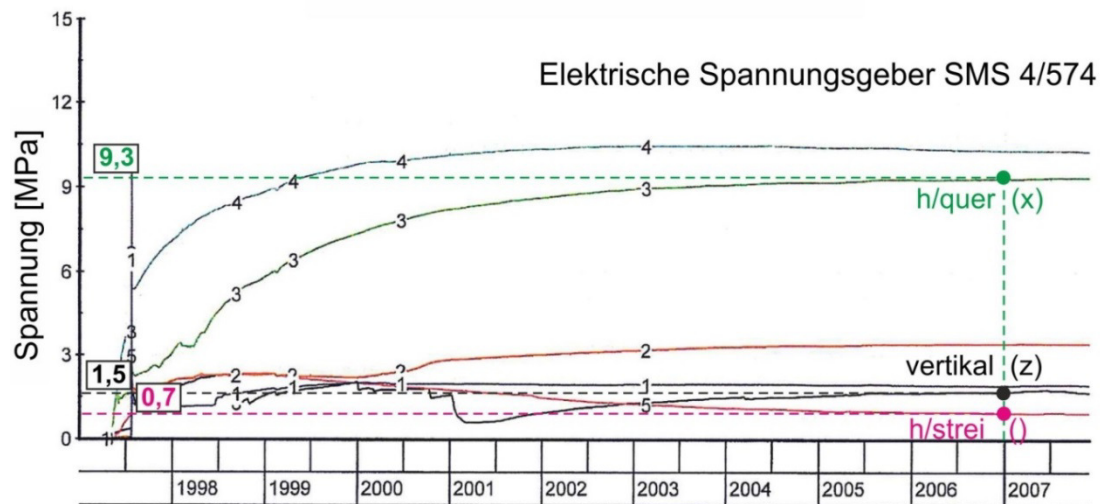


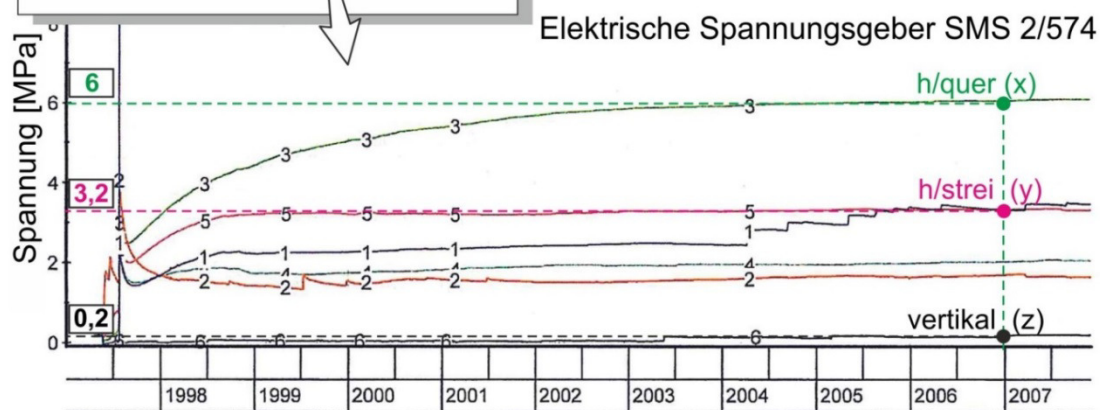
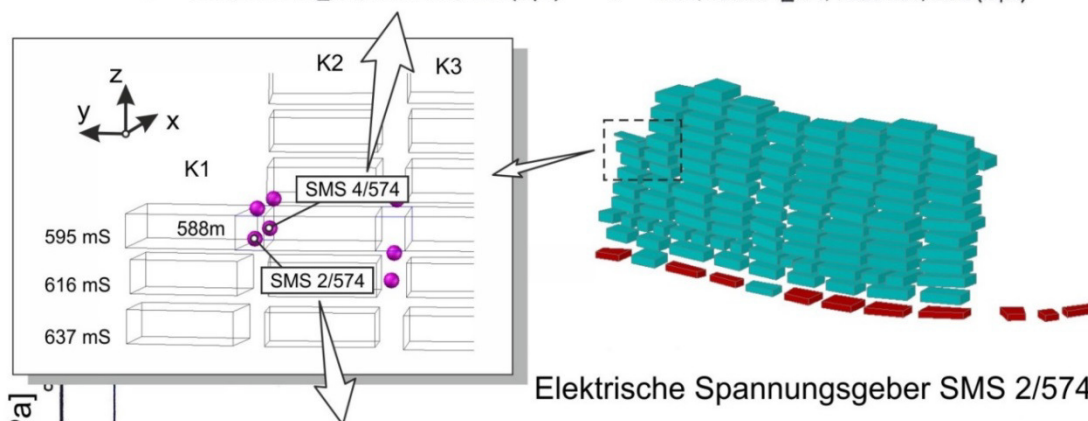
Bild 7.31: Räumliche Position der Spannungsmessstationen (Lage in Pfeilerlängsrichtung angenommen)

In *Bild 7.32* sind exemplarisch die Messdaten für zwei Messpunkte im Pfeiler zwischen den Kammern 1 und 2 in der Teufe $z = 588$ m dargestellt. Der Spannungsmessgeber liefert die Spannungskomponenten in 6 verschiedenen Richtungen. Zum Vergleich wurden dabei die drei Spannungskomponenten in vertikaler (z), in horizontal querschlägiger (x) und in horizontal streichender Richtung (y) zum Asse-Sattel für das Jahr 2007 und damit der aktuellste vorhandene Messpunkt mit einem schon deutlich erkennbaren Kraftschluss herangezogen. Eine kritische Betrachtung zu der Zuverlässigkeit der Messwerte erfolgt hier nicht. Grundsätzlich ist allerdings davon auszugehen, dass Spannungsmessungen mit deutlich mehr Imponderabilien behaftet sind als Deformationsmessungen.

Da die Position der einzelnen Messpunkte einer bestimmten Zone im Berechnungsmodell nicht genau zugeordnet werden kann, wurde das gesamte Spektrum der numerisch ermittelten Spannungen für alle Zonen in dem jeweiligen Pfeiler ausgelesen, dann nach der Größe verteilt und schließlich mit dem Niveau des jeweiligen In-situ-Messwertes verglichen, *Bild 7.33*. Aufgetragen sind die Pfeilerspannungen in x -Richtung (quer), y -Richtung (streichend) und z -Richtung (vertikal). Wie zu erwarten, sind die Pfeilerspannungen in Quer-Richtung und in vertikaler Richtung systematisch größer als die Pfeilerspannungen in streichender Richtung. Hier liegen die Zahlenwerte von wenigen Ausnahmen abgesehen im Bereich von $\sigma_{yy} = 0 - 2$ MPa.



- | | |
|--|--|
| —1— Nord; Station 4_574; Teufe 588; EL 1 (Mpa) | —4— Nord; Station 4_574; Teufe 588; EL 4 (Mpa) |
| —2— Nord; Station 4_574; Teufe 588; EL 2 (Mpa) | —5— Nord; Station 4_574; Teufe 588; EL 5 (Mpa) |
| —3— Nord; Station 4_574; Teufe 588; EL 3 (Mpa) | —6— Nord; Station 4_574; Teufe 588; EL 6 (Mpa) |



- | | |
|---|---|
| —1— Süd; Station 2_574; Teufe 588; EL 1 (Mpa) | —4— Süd; Station 2_574; Teufe 588; EL 4 (Mpa) |
| —2— Süd; Station 2_574; Teufe 588; EL 2 (Mpa) | —5— Süd; Station 2_574; Teufe 588; EL 5 (Mpa) |
| —3— Süd; Station 2_574; Teufe 588; EL 3 (Mpa) | —6— Süd; Station 2_574; Teufe 588; EL 6 (Mpa) |

Bild 7.32: In-situ-Messwerte aus den Spannungsgebern SMS 2/574 und SMS 4/574 und deren Positionierung nach BfS (2008a)

Weiterhin bemerkenswert ist, dass die rechnerisch ermittelten Gebirgsspannungen innerhalb eines Pfeilers zahlenmäßig eine relativ ungleichmäßige Verteilung zwischen Maximal- und Minimalwerten aufweisen. Diese lokal sehr unterschiedlichen Beanspruchungszustände sind auf eine komplexe Beanspruchungssituation in den Pfeilern zurückzuführen (horizontale Stauchung und Schub in vertikaler Richtung). Das gemessene Gebirgsspannungsniveau liegt im Rahmen dieser Verteilung.

Zur Analyse der globalen Spannungsverteilung sind die In-situ-Messwerte und die rechnerisch ermittelten Werte für die horizontal querschlägige x-Richtung in *Bild 7.34* entsprechend ihrer räumlichen Positionierung aufgetragen. Bei den Messdaten wurden dabei nur die Ergebnisse der Messsysteme mit einem stabilen Kurvenverlauf berücksichtigt. Weder in den Messwerten noch in den rechnerisch ermittelten Daten ist eine systematische Verteilung in Verbindung mit den als wesentlich eingeschätzten Wirkungsfaktoren (z.B. Störungzoneneinfluss) zu erkennen. Die Ursache dafür könnte in einer unsystematischen/nicht einheitlichen Positionierung der Messstationen innerhalb der Pfeiler vermutet werden.

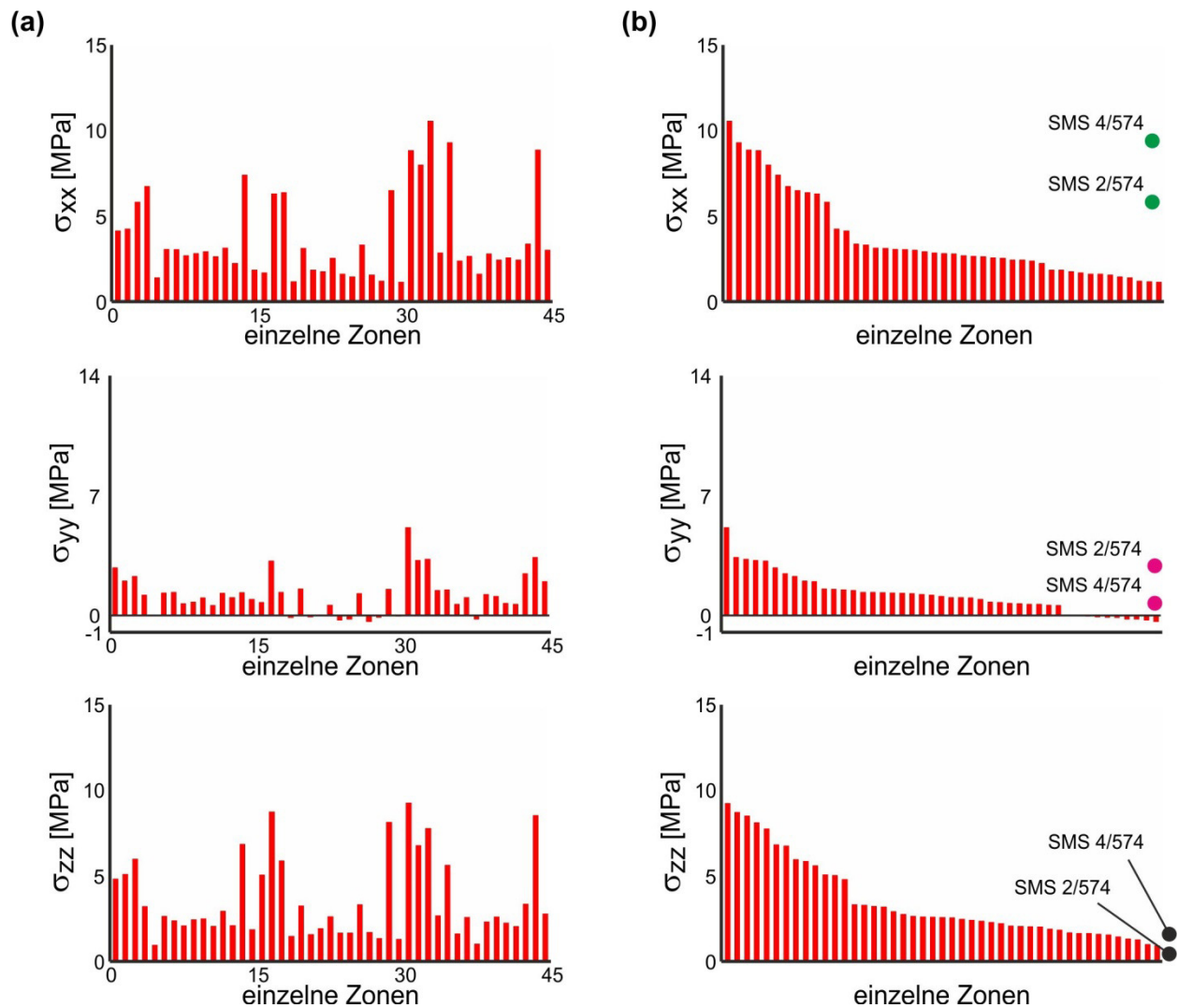


Bild 7.33: Vergleich der numerischen Ergebnisse mit In-situ-Messwerten für die Gebirgsspannungen nach BfS (2008a) für das Jahr 2007 im Pfeiler K1/K2 in 595-m-Sohle mit Zuordnung nach der Zonennummer (a) bzw. nach der Spannungsgröße (b)

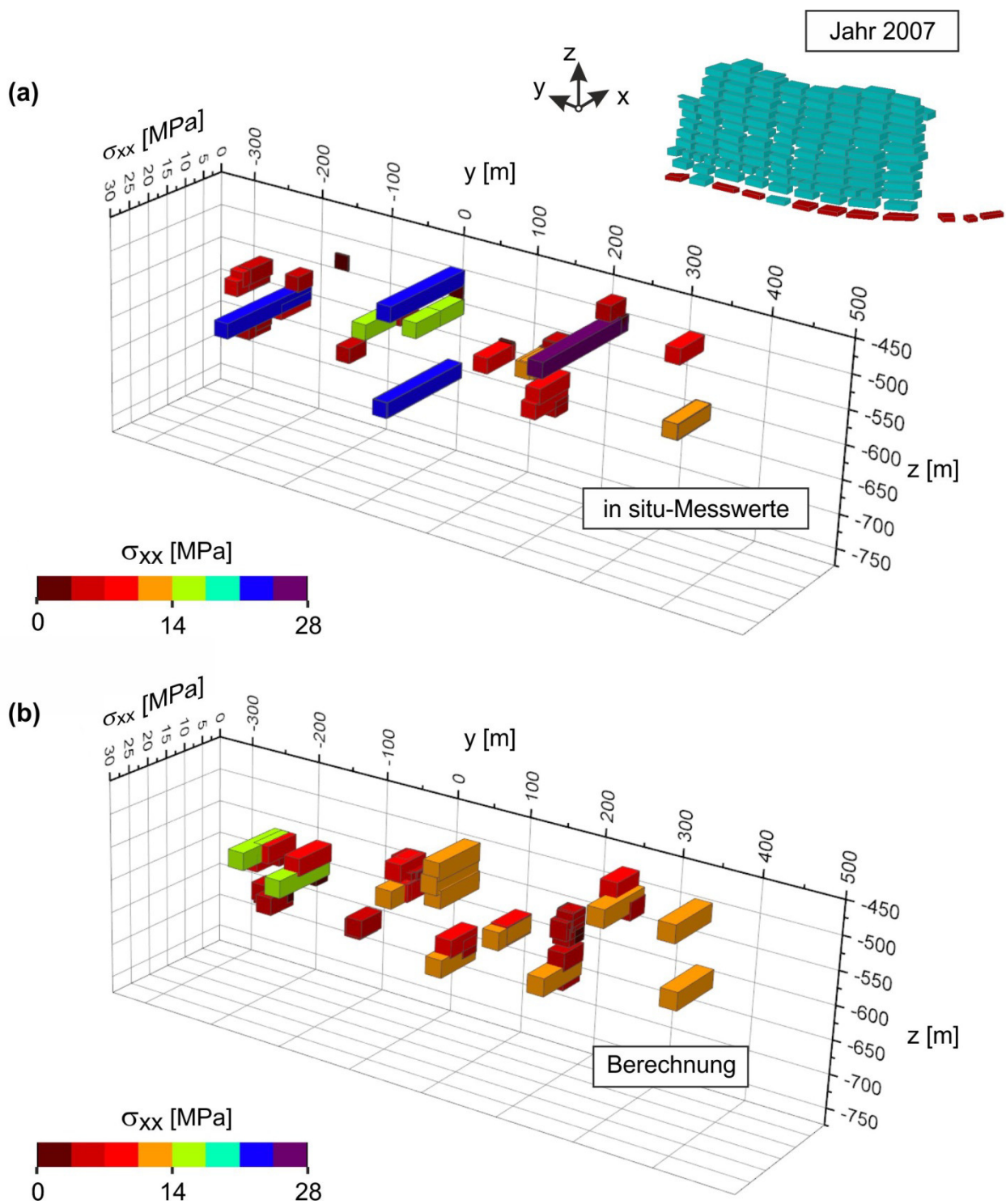


Bild 7.34: Vergleich der In-situ-Messwerte (a) mit den numerischen Ergebnissen (b) für die horizontal querschlägigen Spannungen im Tragsystem

Zur Bestätigung dieser Annahme sind anschließend im Berechnungsmodell die Positionen für die Spannungsmessstationen fiktiv systematisch/einheitlich jeweils in die Pfeilermitte platziert worden, *Bild 7.35*. Aus den zugehörigen rechnerischen Ergebnissen ist die erwartete Systematik erkennbar, *Bild 7.36*:

- Der 20-m-Pfeiler zwischen den Kammerreihen 4 und 5 zeigt zwar ähnlich wie die anderen Pfeiler eine auch infolge von Entfestigungen abgeminderte Beanspruchungsintensität, weist jedoch im Vergleich zu den benachbarten schlankeren Pfeilern infolge von relativ gesehen geringeren Entfestigungen eine insgesamt höhere Beanspruchungsintensität auf und unterteilt somit das gesamte Tragsystem in zwei Teilbereiche mit jeweils bereichsweise stark entfestigten Pfeilern.
- Der untere Bereich des Tragsystems mit einer Teufe unterhalb von 700 m weist höhere Spannungsbeträge im Vergleich zum oberen Bereich auf und erscheint damit weniger entfestigt. Dieser Befund aus dem numerischen System ist auf die großräumigen Gebirgsbewegungen im Nebengebirge mit der Ausbildung von durch die Störungszonen räumlich begrenzten Gebirgsblöcken zurückzuführen. Zu beachten sind bei der Interpretation zusätzlich allerdings auch die großräumigen Lastumlagerungen.

Unter Berücksichtigung der vorstehend beschriebenen Vergleichs-Ergebnisse und ihrer Analyse lassen sich die In-situ-Spannungsmessdaten insgesamt für die Abbildung und die Interpretation globaler großräumiger Effekte im Tragverhalten als nicht optimal geeignet bewerten, sondern eignen sich eher zum Monitoring lokal relevanter Effekte.

7.3.7 Vergleich mit den Versatzdruckmessungen

Zur Beobachtung der Beanspruchungsentwicklung im Versatz (Versatzdruck) und damit als Beleg für die erwartete Ausbildung einer zusätzlichen Tragwirkung zur Entlastung der Pfeiler in den mit Blasversatz verfüllten Kammern der Asse II/Südflanke sind seit Ende 90-er Jahre einige Messstationen überwiegend im Bereich der 616-m-Sohle installiert worden, *Bild 6.9*.

In *Bild 7.37* sind exemplarisch die Messdaten aus den Messsystemen (Druckkissen) in der Kammer 4 auf der 616-m-Sohle dargestellt. Diese Druckkissen liefern die Spannungskomponenten im Versatz in drei Richtungen bzw. in eine Richtung.

Zum Vergleich mit Berechnungsdaten ist die Spannungskomponente in horizontal querschlägiger Richtung (x) in der zeitlichen Entwicklung bis zum Jahr 2009 herangezogen worden. Da die genauen Positionen der Messstationen in den Kammern für die Auswertung nicht bekannt waren, wurde für den Vergleich mit den In-situ-Messwerten das gesamte Spektrum der numerisch ermittelten Spannungen für alle Elemente in der jeweiligen Kammer ausgelesen, dann nach der zahlenmäßigen Größe geordnet und schließlich mit dem Niveau des jeweiligen In-situ-Messwertes verglichen, *Bild 7.38*.

Die in den rechnerischen Ergebnissen erkennbaren, auf Zug beanspruchten Versatzbereiche sind auf die numerische Realisierung mit vorgegebenem kraftschlüssigen Verbund zwischen Versatz und angrenzendem Gebirge zurückzuführen. So führt z.B. die gravitationsbedingte Kompaktion in der Realität zu einer Firstspaltbildung, numerisch entstehen dabei stattdessen aufgrund der Annahme eines zugfesten Verbundes zwischen Versatz und Gebirge Zugbeanspruchungen im oberen Kammerbereich. Die rechnerisch ermittelten Spannungen im Versatz innerhalb einer Kammer weisen eine vergleichsweise ungleichmäßige Verteilung auf. Ursache hierfür ist die komplexe Beanspruchungs- und Kompaktionsgeometrie in der jeweiligen Kammer. Allerdings zeigt sich, dass bei grundsätzlicher Betrachtung das gemessene Spannungsniveau auch in seiner zeitlichen Entwicklung im Rahmen dieser Verteilung liegt.

Zur weiteren Verbesserung in der rechnerischen Abbildung der Kompaktions-Prozesse sowie der Entwicklung des lateralen Stützdruckaufbaus im Versatz sind im Rahmen der physikalischen Modellierung beispielsweise folgende Präzisierungen möglich:

- Berücksichtigung unterschiedlicher Versatzarten,
- Berücksichtigung der Firstspaltbildung.

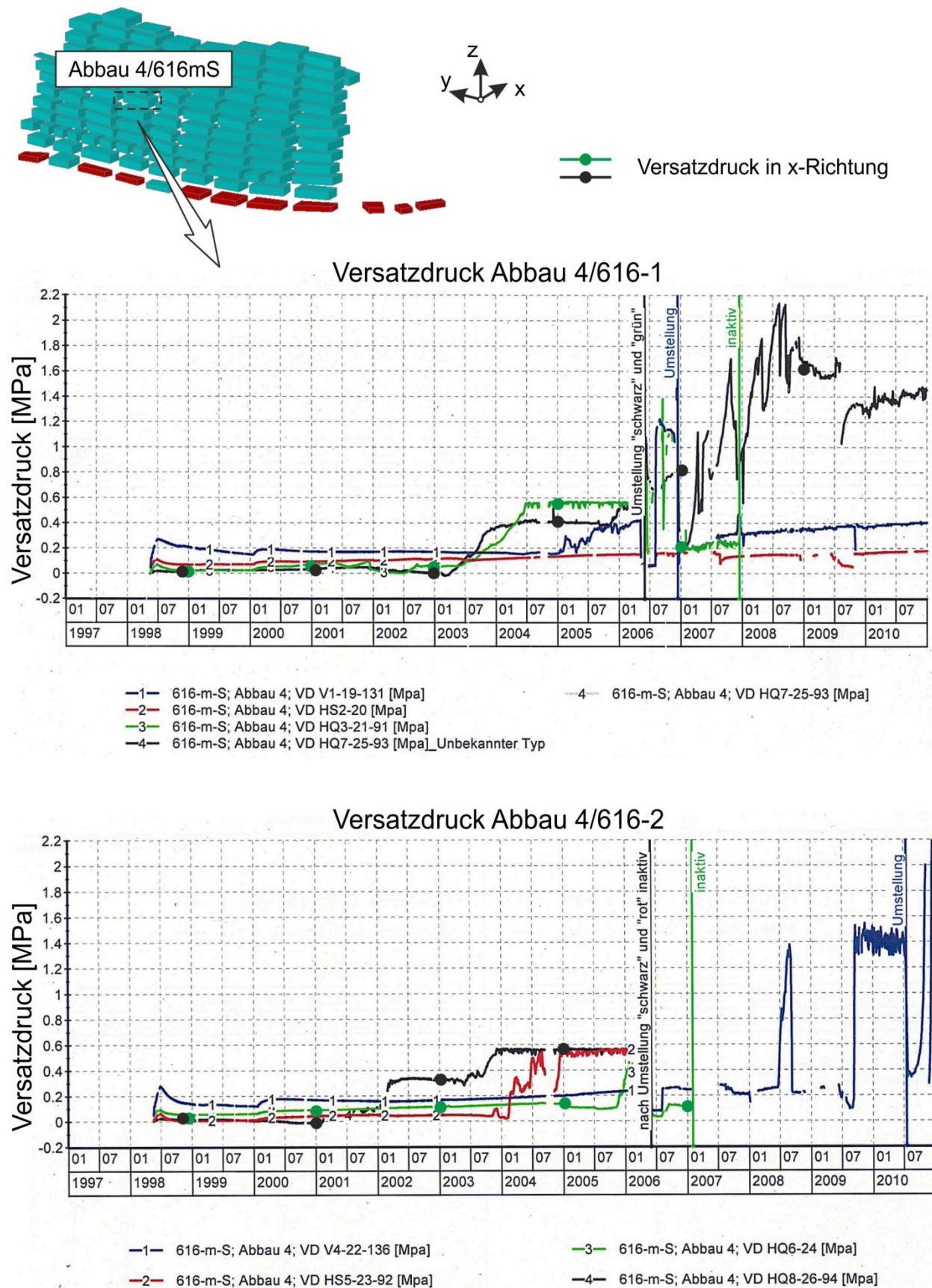


Bild 7.37: In-situ-Messwerte aus den Versatzdruckmessungen für die Kammer 4 auf 616-m-Sohle, ASSE-GmbH (2011a)

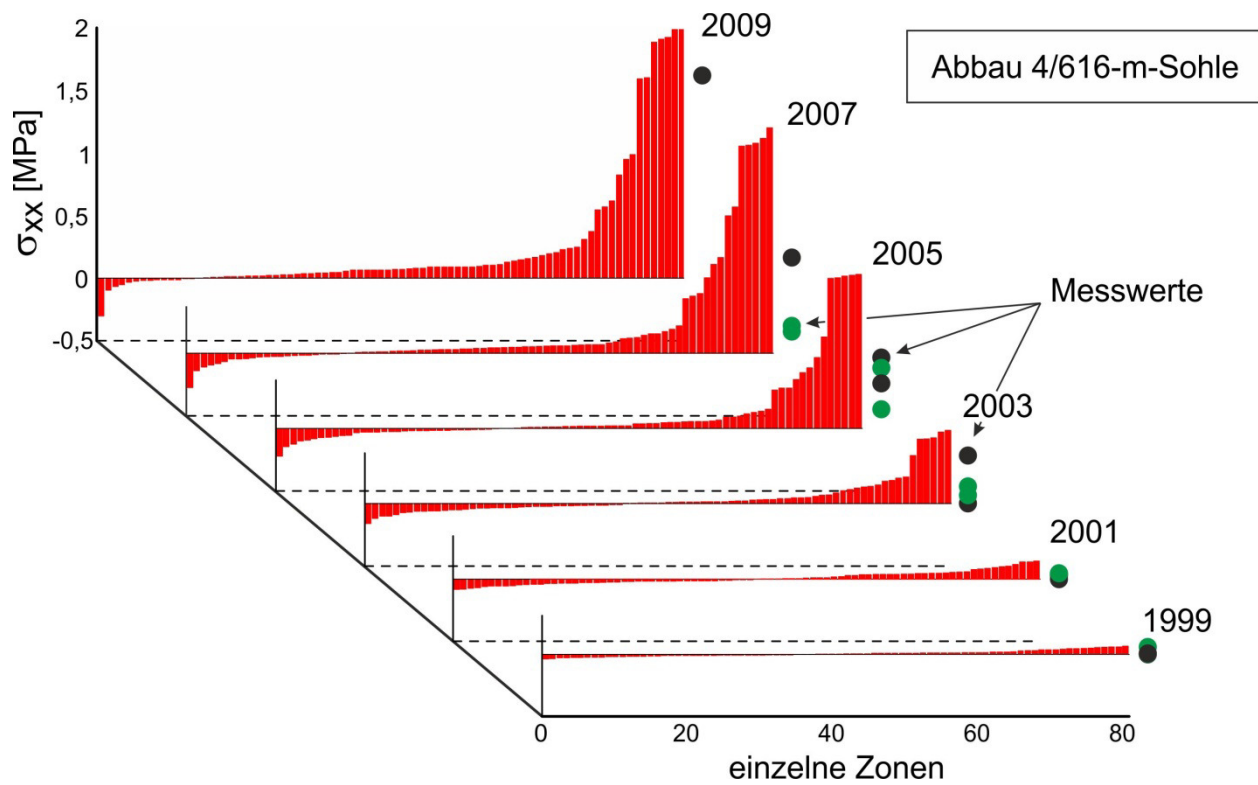


Bild 7.38: Exemplarischer Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den In-situ-Messwerten nach ASSE-GmbH (2011a) für die horizontal querschlägigen Spannungen im Versatz in der Kammer 4 auf 616-m-Sohle (Zeitperiode 1999-2009)

7.4 Zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Validierung erzielten Ergebnisse

Im Rahmen der Etappe II wurden folgende wesentliche Ergebnisse erzielt:

- 1) Eine erste 3D-Modellreihe wurde erstellt mit
 - 3D-Modell für die gesamte Asse II/Südflanke (Basismodell),
 - 3D-Modell für die halbe Asse II/Südflanke Westteil (West-Teilmodell),
 - 3D-Modell für die halbe Asse II/Südflanke Ostteil (Ost-Teilmodell).
- 2) Mit dem 3D-Basismodell für das gesamte Tragsystem wurde die Validierung anhand als für das Tragverhalten charakteristisch angesehener In-situ-Messwerte erfolgreich durchgeführt.
- 3) Ein erster umfassender Vergleich von Ergebnissen numerischer Simulationen mit dem 3D-Basismodell wurde für die gesamte Asse II/Südflanke mit den verfügbaren In-situ-Messwerten zum Tragverhalten der Asse II/Südflanke durchgeführt. Dieser Vergleich zeigt:
 - Im Bereich des Grubengebäudes sind gute Übereinstimmungen in Bezug auf die Gebirgsverschiebungen zu verzeichnen (Pfeilerstauchungs-Messwerte, Inklinometer-Messwerte und Festpunktverschiebungs-Messwerte).
 - Die rechnerisch ermittelten Oberflächenabsenkungen und damit die großräumigen Gebirgsbewegungen zeigen dagegen derzeit nur eine qualitative Übereinstimmung und weichen quantitativ wesentlich von den Messwerten ab. Diese Abweichung ist insbesondere auf die Existenz verschiedener Imponderabilien im Deck- und Nebengebirge zurückzuführen (z.B. Materialparameter für die relevanten Nichtsalinar-Gebirgsformationen, Lage und Materialeigenschaften der Störungszonen).
 - Die Spannungs-Messwerte (Spannungsgeber im Gebirgs-Tragsystem und Druckkissen im Versatz) werden bei pauschalierender Betrachtung durch die Berechnungsbefunde in der zahlenmäßigen Größenordnung zutreffend eingeschätzt. Dabei ist zu beachten, dass Angaben zur genauen Lokalisierung der Messstationen nicht vorgelegen haben. Allerdings muss auch festgestellt werden, dass diese Messsysteme als weniger geeignet für die Erfassung globaler Entwicklungen im Tragsystem einzustufen sind. Sie können aufgrund ihrer Sensitivität gegenüber lokalen Einflüssen bis hin zur Qualität der Installation als eher geeignet für die tendenzielle Charakterisierung lokaler Beanspruchungssituationen angesehen werden.

Insgesamt ist eine plausible qualitative und eine teilweise auch quantitativ sehr gute bis zufriedenstellende Übereinstimmung der Ergebnisse aus der numerischen Simulation mit dem 3D-Gesamtmodell mit dem gesamten Datenkollektiv der vorhandenen, bezüglich der Messgrößen auch sehr unterschiedlichen In-situ-Messwerte festzustellen (Deformationsmessungen, Spannungsmessungen).

Vor diesem Hintergrund wird das neu entwickelte und standortbezogen in einem ersten Schritt bezüglich der vorhandenen Messdaten umfassend validierte 3D-Gesamtmodell – Asse II/Südflanke als ein Instrumentarium angesehen, das prinzipiell geeignet ist, im Rahmen der getroffenen Annahmen und Voraussetzungen eine aus gebirgsmechanischer Sicht plausible und angemessen realitätsnahe retrospektive Abbildung von globalen geomechanischen Prozessen zu ermöglichen. Damit kann das 3D-Gesamtmodell auch als ein geeignetes Instrumentarium zur Erstellung von hinreichend zuverlässigen prognostisch orientierten Simulationen bzw. Tragwerksanalysen bewertet werden.

Vorausgesetzt ist bei dieser Interpretation der Berechnungsbefunde allerdings, dass die in das Simulationsmodell implementierten Annahmen und Voraussetzungen zu den noch vorhandenen Imponderabilien auch tatsächlich zutreffen.

8 Anwendung des entwickelten Konzeptes am Beispiel der Schachtanlage Asse II/Südflanke – Etappe III: Anwendung des Globalmodells auf die vorgegebenen Fragestellungen

Das auf den vorherigen Etappen aufgebaute und validierte Globalmodell kann nun auf die vorgegebenen Fragestellungen angewendet werden. Diese Etappe ist in der Praxis für numerische Untersuchungen im Hinblick auf die Erarbeitung von Aussagen zu Standsicherheit und Funktionalität gebirgsmechanischer Konstruktionen bzw. Anlagen von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit jedoch steht die Analyse des Tragverhaltens der Schachtanlage Asse II nicht im Fokus. Die Schachtanlage dient hier nur als Beispiel für ein komplexes geomechanisches System und zur Anwendung des entwickelten Konzeptes zur optimierten Durchführung numerischer Untersuchungen zum Tragverhalten von großräumigen untertägigen Systemen mit filigranen Strukturen bei Anwesenheit von Imponderabilien. Daher wird hier die Leistungsfähigkeit des nach dieser Konzeption erarbeiteten Simulationsmodells nur exemplarisch anhand einer Prognose zum Verformungsverhalten des Grubengebäudes demonstriert, *Bild 8.1*.

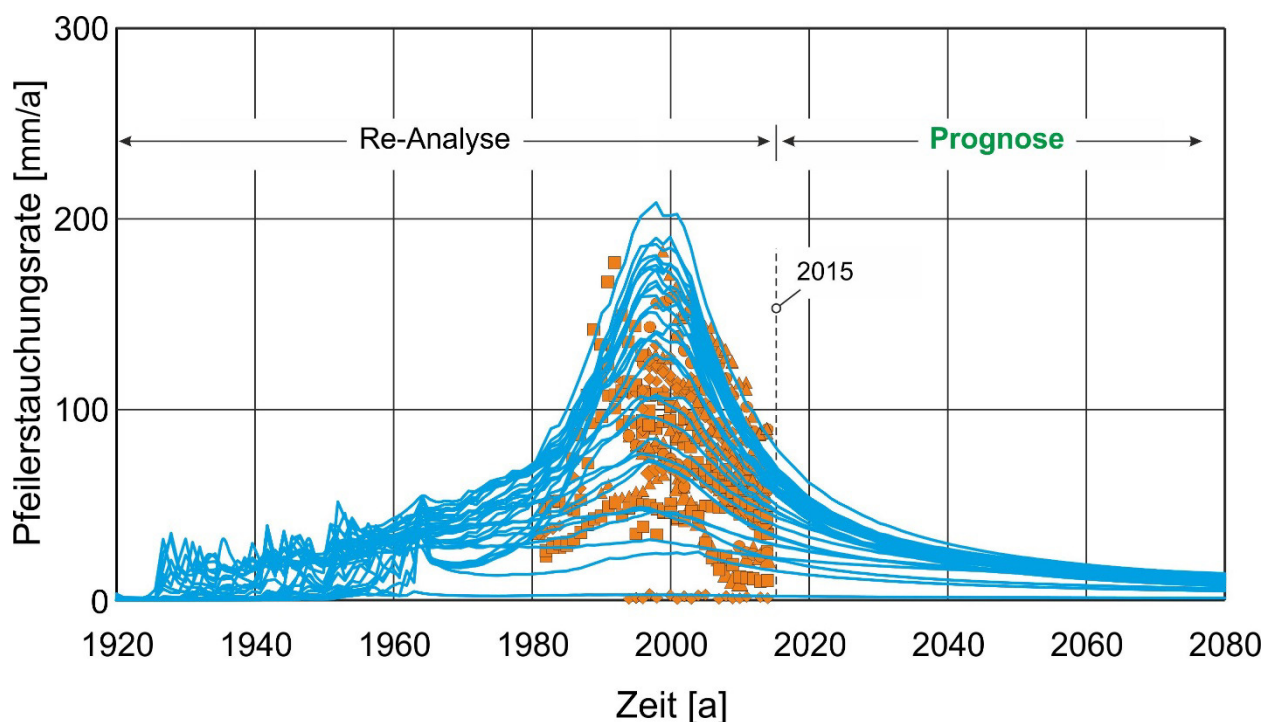


Bild 8.1: Zeitliche Entwicklung von gemessenen Pfeilerstauchungsraten und rechnerisch ermittelten Pfeilerstauchungsraten mit dem 3D-Modell für die gesamte Asse II/Südflanke – historische und prognostische Simulation

Es ist hier anzumerken, dass diese prognostische Analyse nur unter den getroffenen Annahmen und Voraussetzungen sowie ohne Berücksichtigung von zusätzlich möglichen, in der Zukunft auftretenden Wirkungsfaktoren gilt. Dieses Ergebnis mit dem fortlaufend degressiven zeitlichen Verlauf der Pfeilerstauchungsraten steht im Einklang mit dem schon mithilfe des Funktionsmodells Q-3D-Modell festgestellten Systemverhalten.

Bei weitergehendem Interesse ist eine Zusammenfassung von Ergebnissen der durchgeführten prognostischen Analysen für verschiedene Szenarien mit dem entwickelten Instrumentarium in *Lux, K.-H., Düsterloh, U., Lerche, S., Dyogtyev, O., Pan, T. (2015)* und *Öko (2016)* zu finden.

Eine ausführliche Darstellung von Ergebnissen der prognostischen Analysen würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten, da derartige Simulationen hier nicht im Fokus stehen.

9 Anwendung des entwickelten Konzeptes am Beispiel der Schachtanlage Asse II/Südflanke – Etappe IV: Realisierung des eingebauten Modifikationspotenzials

9.1 Modifikation des 3D-Gesamtmodells durch die Neudiskretisierung eines der schon zur Verfügung stehenden Teilmodelle

Im Rahmen des in dieser Arbeit entwickelten Konzeptes zur optimierten Durchführung numerischer Simulationen anhand von großräumigen Berechnungsmodellen mit filigranen Teilstrukturen ist unter anderem die Möglichkeit vorgesehen, innerhalb der vordefinierten Teilmodelle mit einem vergleichsweise geringen Zeitaufwand eine Neudiskretisierung vorzunehmen. Diese Neudiskretisierung kann erforderlich werden zur Bearbeitung zusätzlicher Fragestellungen, für die das bisher erstellte Berechnungsmodell nicht optimal diskretisiert ist.

Dieses in die konzeptuelle Ausgestaltung implementierte Potenzial zu flexiblen Diskretisierungsmodifikationen wird nachstehend am Beispiel einer Neudiskretisierung innerhalb des Teilmodells „Grubengebäude“ im Rahmen des im Kapitel 7 vorgestellten 3D-Gesamtmodells für die Asse II/Südflanke demonstriert.

In diesem Teilmodell waren bisher in Richtung der charakteristischen Dimension (Kammerhöhe bzw. Schwebendicke) 3 Zonen als Feinheitegrad realisiert. Diese angesichts der Tragwirkung vergleichsweise geringe Diskretisierung wurde ausgewählt, um eine umfangreiche Validierung verbunden mit einer großen Anzahl von Variationen in einer akzeptablen Zeit zu ermöglichen. Wie in Kapitel 7 demonstriert, hat diese Festlegung zu einer erfolgreichen Validierung globaler Prozesse geführt.

Allerdings ist bekannt, dass zur realitätsnahen Abbildung starker Entfestigungsprozesse in den Tragsystemelementen (Pfeiler, Schweben) eine feinere Diskretisierung empfehlenswert ist, *Wolters, R., Herchen, K., Düsterloh, U. & Lux, K.-H. (2010)*. Aus diesem Grund wurde hier exemplarisch die Anzahl der Zonen in Richtung der charakteristischen Dimension um den Faktor 2 und somit auf 6 Zonen erhöht, *Bild 9.1*. Dieser Grad der Diskretisierungsverfeinerung führt zu einer Erhöhung der Zonenanzahl in dem modifizierten Teilmodell um den Faktor 8. An den Grenzen des neu diskretisierten Teilmodells wurde die Verbindung mit den angrenzenden Teilmodellen durchgehend mit „Attach“-Elementen realisiert. Die Zonenanzahl im Gesamtmodell ist dabei von ca. 320.000 Zonen auf ca. 1 Mio. Zonen gestiegen.

Das Beispiel zeigt damit eine erfolgreiche Realisierung der im Rahmen des verwendeten Konzeptes vorhandenen Möglichkeiten zu einer flexiblen Modifizierung der Diskretisierung

vordefinierter Modellbereiche/Teilmodelle. Der Aufbau neuer Gesamtmodelle ist damit nicht erforderlich.

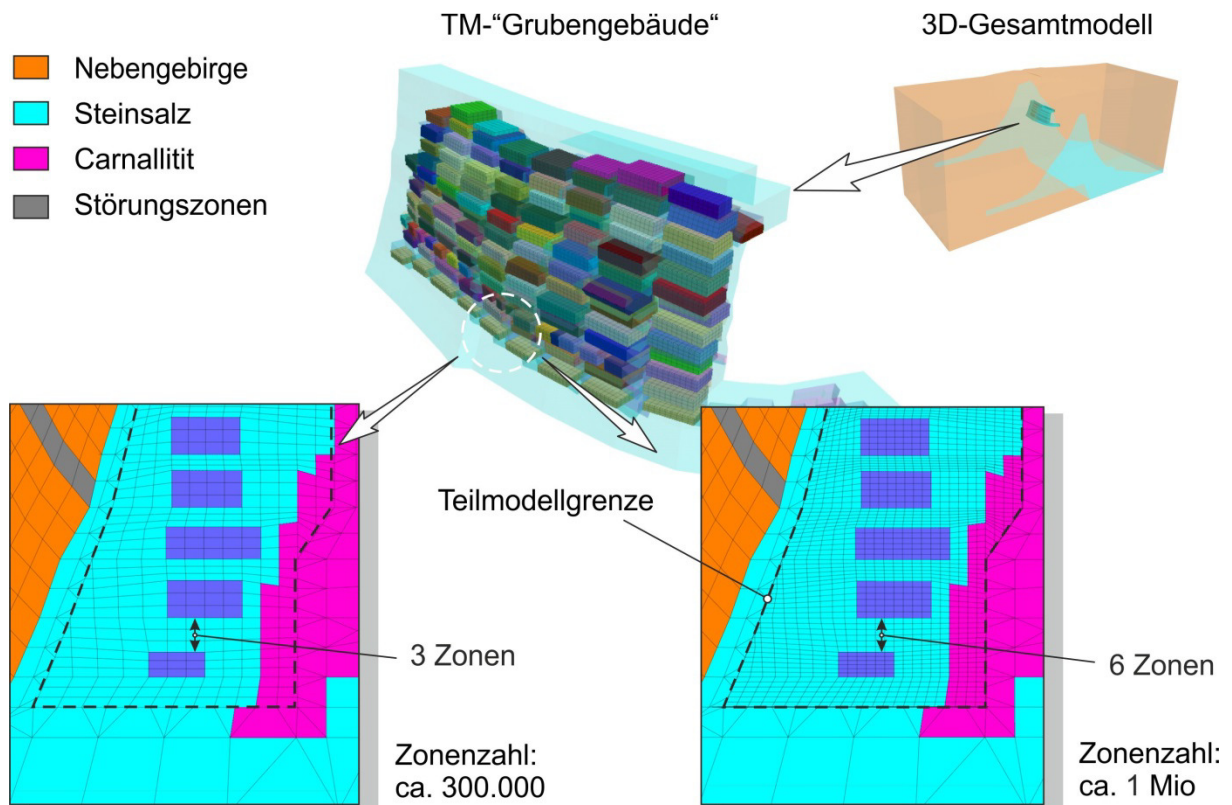


Bild 9.1: Netzverfeinerung im Teilmodell-„Grubengebäude“ des 3D-Gesamtmodells

9.2 Implementierung eines Lokalmodells in die filigrane Struktur des existierenden 3D-Gesamtmodells durch die Definition neuer Teilmodelle

Das enthaltene Potenzial zu flexiblen Diskretisierungsmodifikationen im Rahmen des entwickelten Konzeptes zur optimierten Durchführung numerischer Simulationen wird nachstehend am zweiten Beispiel einer Neudiskretisierung mit starker lokaler Verfeinerung relativ kleiner Bereiche im Rahmen des in Kapitel 7 vorgestellten 3D-Gesamtmodells für die Asse II/Südflanke demonstriert. Eine derartige Diskretisierungsverfeinerung kann sinnvoll sein für die Bearbeitung von Fragestellungen lokaler Art, z.B. im Hinblick auf die Untersuchung lokaler mechanischer Phänomene oder die Ausweitung geplanter technologischer Eingriffe in das Tragsystem. Dabei werden die Randbedingungen für das Lokalmodell, die sich aus der räumlich-zeitlichen Einbettung des Lokalmodells in das Globalmodell ergeben und die

Wechselwirkung charakterisieren, weitgehend realitätsnah berücksichtigt: Variante ‚Lokalmodell im Gesamtmodell‘ statt Variante ‚Lokalmodell mit Randbedingungen‘.

Hier wurde ein derartiges Lokalmodell für die Analyse/Demonstration der räumlichen Verteilung der Versatzverdichtung und der Entfestigungsprozesse in der Nähe der Kammer 7/750 der Südflanke entwickelt. Dabei wurde innerhalb der Kammer und in ihrer unmittelbaren Umgebung die Neudiskretisierung vorgenommen, so dass in charakteristischer Richtung (Kammerhöhe) 27 Zonen verwendet wurden.

Im Gegensatz zu der in Kapitel 9.1 demonstrierten Diskretisierungsmodifikation innerhalb eines schon existierenden Teilmodells mit nur einem Bearbeitungsschritt waren hier zur Erstellung eines Lokalmodells mehrere Bearbeitungsschritte in der dem entwickelten Konzept entsprechenden Vorgehensweise notwendig:

- 1) Festlegung der Lokalmodellgrenze,
- 2) Festlegung neuer Teilmodelle innerhalb des Lokalmodells,
- 3) Erstellung des FD-Modells im Simulator FLAC3D (Diskretisierung).

Nachstehend werden diese Bearbeitungsschritte ausführlicher erläutert.

(1) Festlegung der Lokalmodellgrenze

Die Grenzen des Lokalmodells wurden so festgelegt, dass der zu untersuchende Lokalbereich (Kammer 7/750) und der technisch notwendige Übergangsbereich (angrenzende Pfeiler- und Schwebenbereiche) als Hauptbestandteile des neu zu diskretisierenden Lokalmodells innerhalb dieser Grenzen angeordnet sind, *Bild 9.2*. Zur Gewährleistung der Kontinuität der Diskretisierungsstruktur wurde dabei der Verlauf der Grenze entlang der schon im Gesamtmodell existierenden Diskretisierung definiert.

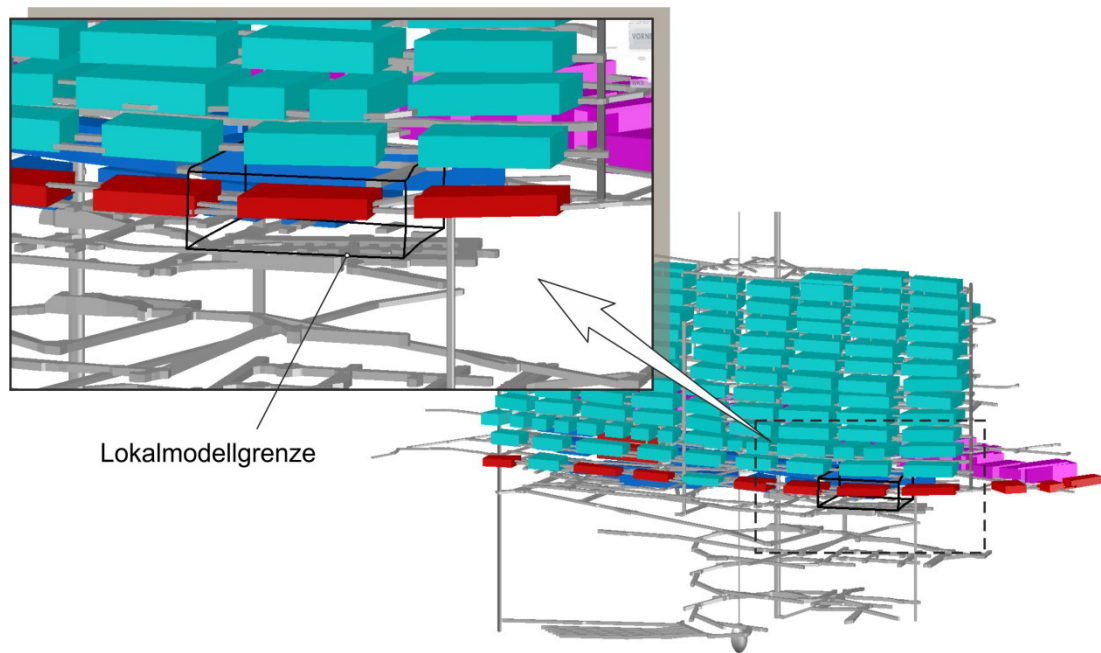


Bild 9.2: Positionierung der Lokalmodellgrenzen innerhalb der existierenden Diskretisierung

(2) Festlegung neuer Teilmodelle innerhalb des Lokalmodells

Das gesamte Lokalmodell wurde in einige Teilmodelle mit jeweils unterschiedlichem Feinheitsgrad bezüglich der Diskretisierung unterteilt. Wie aus *Bild 9.3* zu erkennen ist, gewährleisten diese Teilmodelle einen mehrstufigen kontinuierlichen Übergang von der existierenden, vergleichsweise groben Diskretisierung des Gesamtmodells zu einer wesentlich feineren Diskretisierung im Untersuchungsbereich. Im nächsten Schritt wurde die Diskretisierung für jedes Teilmodell individuell festgelegt und in der 3D-Zeichnung skizziert. Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes wurden etwa 5000 geometrische Primitive (Punkte, Linien) erstellt.

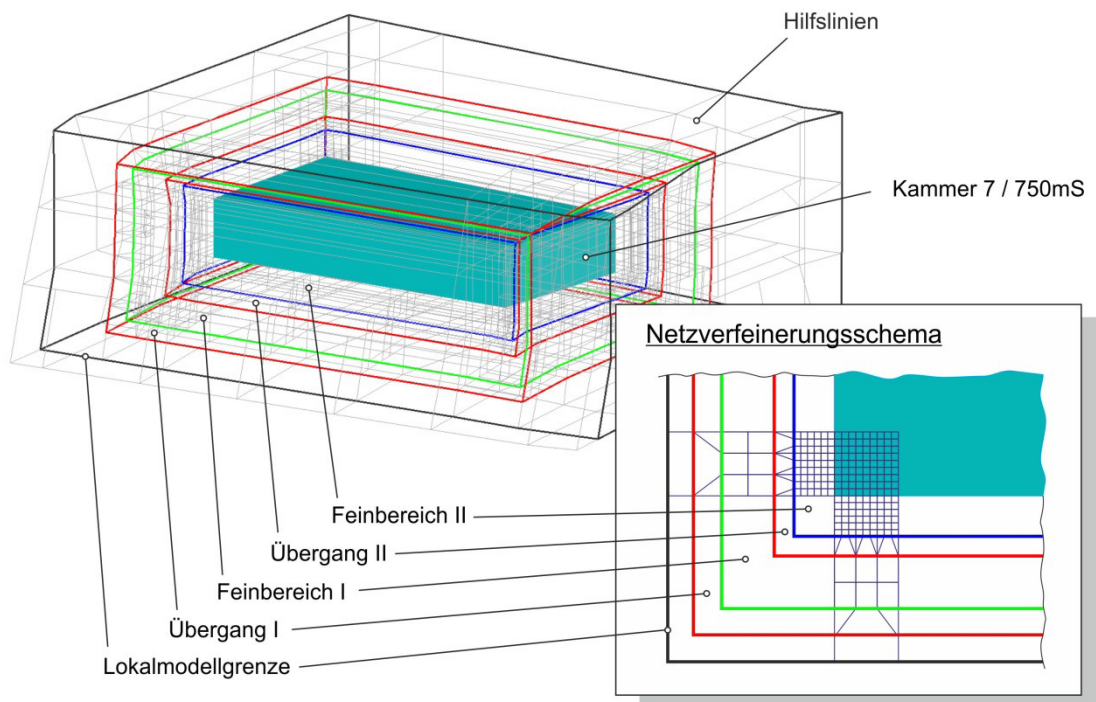


Bild 9.3: Position neuer Teilmodelle und schematische Darstellung der Diskretisierungsfeinerung im Lokalmmodell

(3) Erstellung des FD-Modells im Simulator FLAC3D

Anschließend wurde anhand der vorbereiteten 3D-Zeichnung ein FD-Modell im Simulator FLAC3D erstellt. Das neu entwickelte Lokalmmodell beinhaltet ca. 206.000 Zonen bei ca. 3500 Zerteilungen. Das gesamte globale 3D-Modell mit dem integrierten Lokalmmodell besteht dabei aus ca. 520.000 Zonen, *Bild 9.4*.

Die charakteristische Größe der Zonen im fein diskretisierten Modellbereich II des Lokalmodells entsprechend *Bild 9.3* beträgt ca. 0,37 m statt ursprünglich ca. 3,3 m.

Durch die Implementierung des Lokalmodells wurde damit linear eine 9-fache bzw. volumenbezogen eine 700-fache Diskretisierungsverfeinerung in dem neu diskretisierten Bereich erreicht.

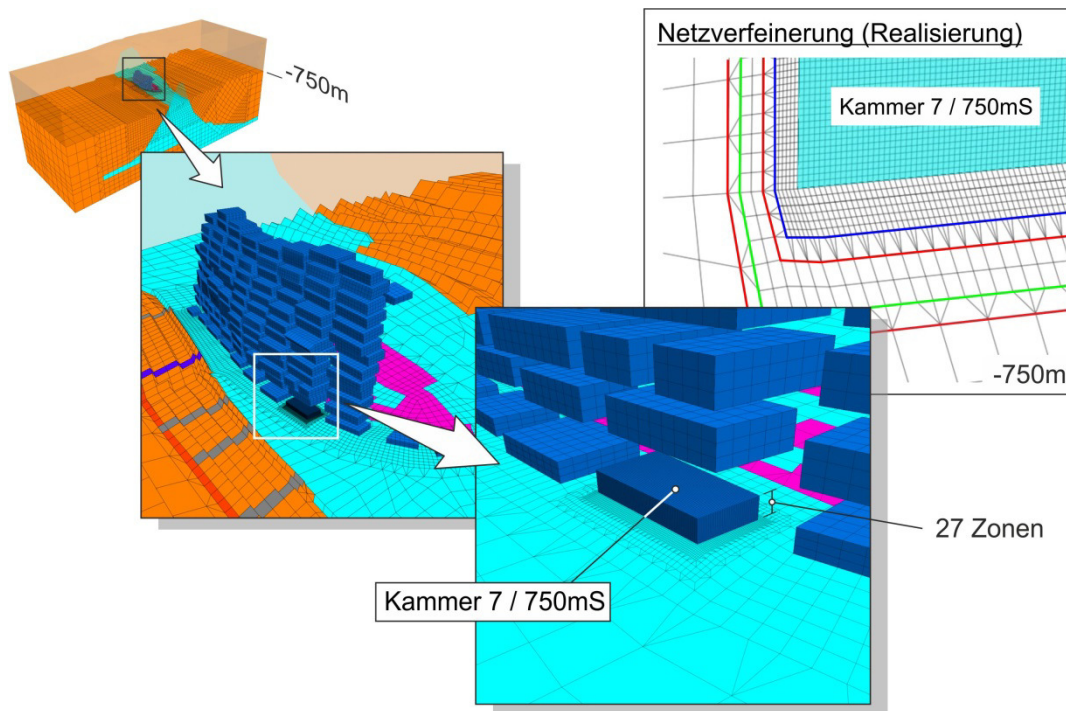


Bild 9.4: FD-Modell im FLAC3D für das 3D-Gesamtmodell mit dem integrierten Lokalmmodell für die Kammer 7/750

9.3 Zusammenfassende Bewertung der erzielten Ergebnisse

Zur Bewertung der vorstehend beschriebenen modifizierten 3D-Modelle werden die mit diesen Modellen erzielten numerischen Ergebnisse exemplarisch vergleichend vorgestellt.

Zum Vergleich stehen damit drei 3D-Berechnungsmodelle zur Verfügung:

- 1) 3D-Gesamtmodell mit 3 Zonen entlang der charakteristischen Dimension („3 Zonen“),
- 2) 3D-Gesamtmodell mit 6 Zonen entlang der charakteristischen Dimension („6 Zonen“),
- 3) 3D-Gesamtmodell („3 Zonen“) mit implementiertem Lokalmmodell für die Kammer 7/750 mit 27 Zonen entlang der charakteristischen Dimension („27 Zonen“).

Für die beiden ersten Modelle werden exemplarisch die Ergebnisse der globalen Re-Analyse der Pfeilerstauchungsraten untereinander verglichen. Dabei ist zu erwähnen, dass im 3D-Gesamtmodell „6 Zonen“ die Zonenanzahl im Vergleich zum 3D-Gesamtmodell „3 Zonen“ etwa um Faktor 3 angestiegen ist (von ca. 300.000 Zonen auf ca. 1 Mio. Zonen). Diese relativ hohe Zonenanzahl führte dann erwartungsgemäß zur Erhöhung des Rechenzeitaufwandes ca. um Faktor 5 (4 bis 6 Wochen pro Variationslauf). Eine realitätsnahe Re-Analyse der zeitlichen Entwicklung des Grubengebäudes anhand der charakteristischen In-situ-Messwerte konnte bei diesem Zeitaufwand nur aufgrund der schon zuvor aufgebauten Vorerkenntnisse

(Variationsanalyse mit 3D-Gesamtmodell „3 Zonen“) erzielt werden. Der in *Bild 9.5* dargestellte Vergleich der mit diesem Modell erzielten numerischen Ergebnissen mit den charakteristischen In-situ-Messwerten (Pfeilerstauchungsraten) zeigt wiederum eine gute Übereinstimmung. Damit öffnen sich durch die Nutzung dieses feiner diskretisierten Modells zusätzliche Möglichkeiten zu vertieften numerischen Analysen.

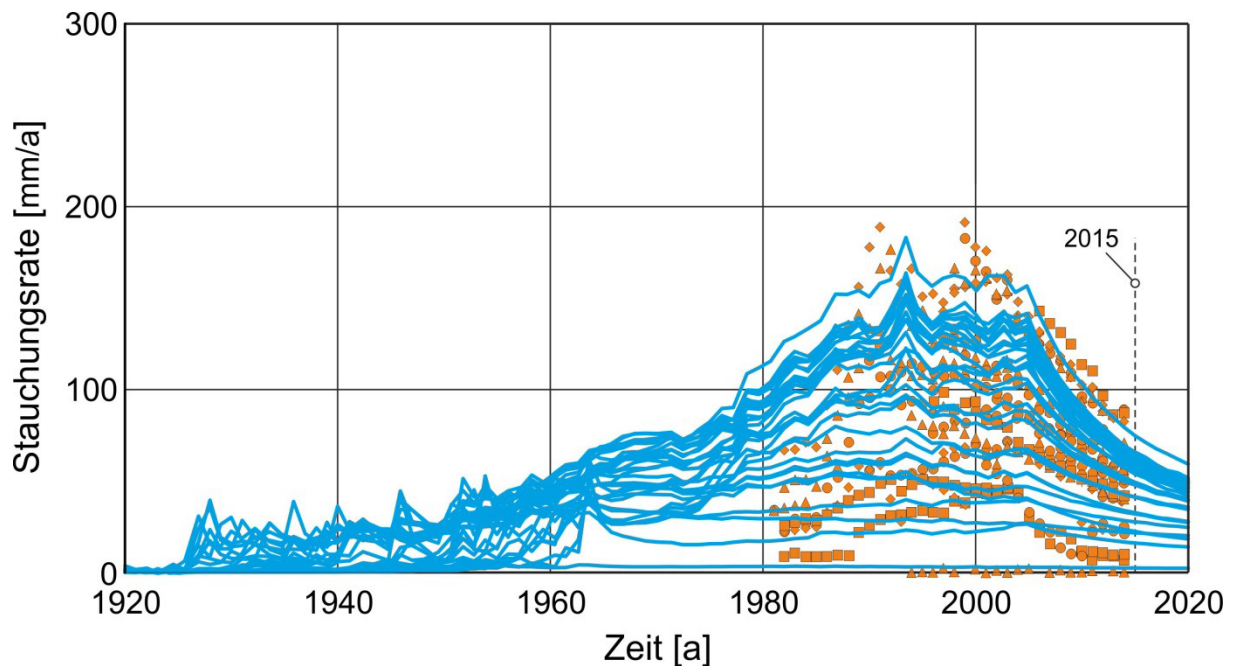


Bild 9.5: Vergleich von numerischen Ergebnissen mit den In-situ-Messwerten für die Pfeilerstauchungsraten anhand des modifizierten 3D-Gesamtmodells „6 Zonen“ mit 1 Mio. Zonen

Bild 9.6 zeigt weiterhin, dass eine weitere Diskretisierungsverfeinerung in diesem Teilmodell zwar mit einem relativ geringen Zeitaufwand möglich wäre, diese jedoch zu einer nicht mehr handhabbaren Modellgröße führen würde, bedingt durch die aktuell üblichen Rechnerleistungen.

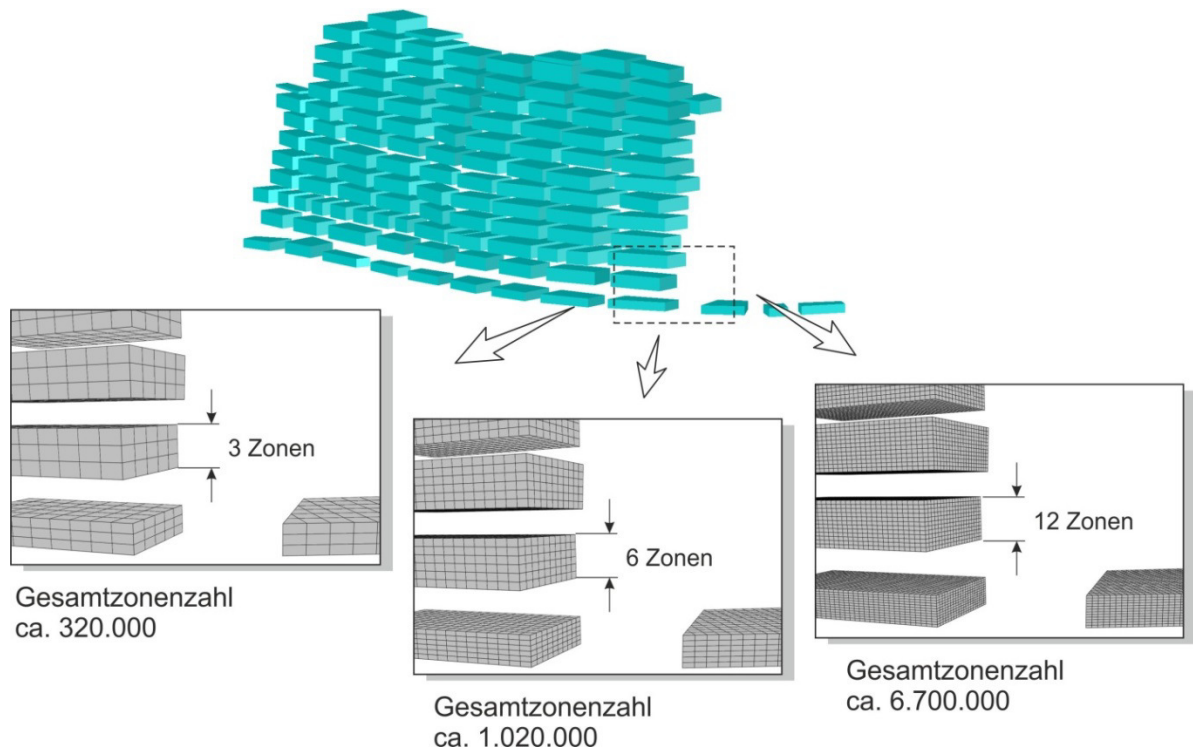


Bild 9.6: Demonstration der Änderung des Diskretisierungsgrades im 3D-Berechnungsmodell mit Verfeinerung des Grubengebäudebereiches basierend auf dem Teilmodell-Prinzip

Als eine sinnvollere Möglichkeit für die Bearbeitung lokalspezifischer Fragestellungen für das betrachtete geomechanische System Asse II/Südflanke mit seiner geschichtlichen Entwicklung wird daher eher eine zonale Diskretisierungsverfeinerung im Modell angesehen - wie exemplarisch als 3D-Gesamtmodell „3 Zonen“ mit Lokalmmodell „27 Zonen“ vorstehend demonstriert.

Nachstehend werden nun die lokalspezifischen Ergebnisse im Bereich der Kammer 7/750 für die drei 3D-Berechnungsmodelle verglichen.

In *Bild 9.7* ist Verteilung der Versatzdichten in der Kammer 7/750 exemplarisch für das Jahr 2015 dargestellt. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass sich unabhängig von dem jeweils verwendeten 3D-Berechnungsmodell eine qualitativ gleiche Verteilung der Versatzdichten ausbildet. Mit dem Lokalmmodell „27 Zonen“ ist jedoch im Gegensatz zu den 3D-Gesamtmodellen ohne Erweiterung mit einem Lokalmmodell zusätzlich eine Analyse der Verdichtungsverteilung innerhalb der Kammer 7/750 möglich. Dabei gibt der Diskretisierungsgrad im Bereich des Lokalmmodells sogar bei Bedarf die Möglichkeit einer weitgehend realitätsnahen Berücksichtigung der tatsächlichen Kammergeometrie.

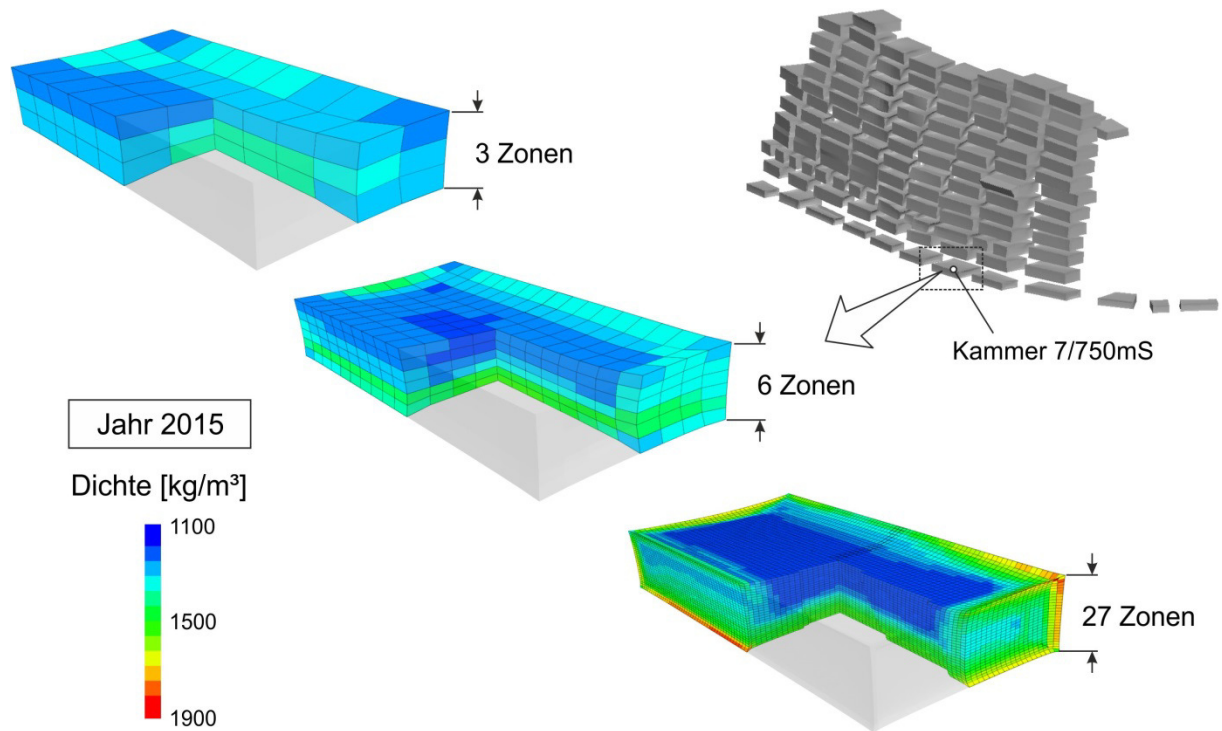


Bild 9.7: Exemplarischer Vergleich der numerischen Ergebnisse für die Dichteverteilung im Versatz für das Jahr 2015 in der Kammer 7/750 für drei 3D-Berechnungsmodelle

In *Bild 9.8* ist weiterhin die Verteilung der Dilatanz in dem Pfeiler auf der Ostseite der Kammer 7/750 exemplarisch für das Jahr 2015 dargestellt. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass mit der Erhöhung des Verfeinerungsgrades der Diskretisierung ein zunehmend plausibleres qualitatives Entfestigungsbild (Dilatanzverteilung) simuliert werden kann. Es ist somit festzustellen, dass das „3 Zonen“-3D-Gesamtmodell zwar zur Abbildung globaler Entfestigungsprozesse geeignet ist, zur Abbildung lokaler Entfestigungsprozesse jedoch eine wesentlich feinere Diskretisierung notwendig ist - so wie sie beispielsweise mit dem „27 Zonen“-Lokalmodell realisiert wurde.

Zusammenfassend wird in *Bild 9.9* eine schematische Gegenüberstellung der drei 3D-Gesamtmodelle in Bezug auf die Modellgröße/Zonenanzahl vorgenommen. Dieses Modellmerkmal ist von besonderer Bedeutung in Bezug auf die Möglichkeiten zur Durchführung der notwendigen Anzahl von numerischen Simulationen zum Erreichen der Untersuchungsziele. Entsprechend den zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten kann das Modell diesbezüglich eine gut handhabbare oder eine weniger gut handhabbare Größe haben.

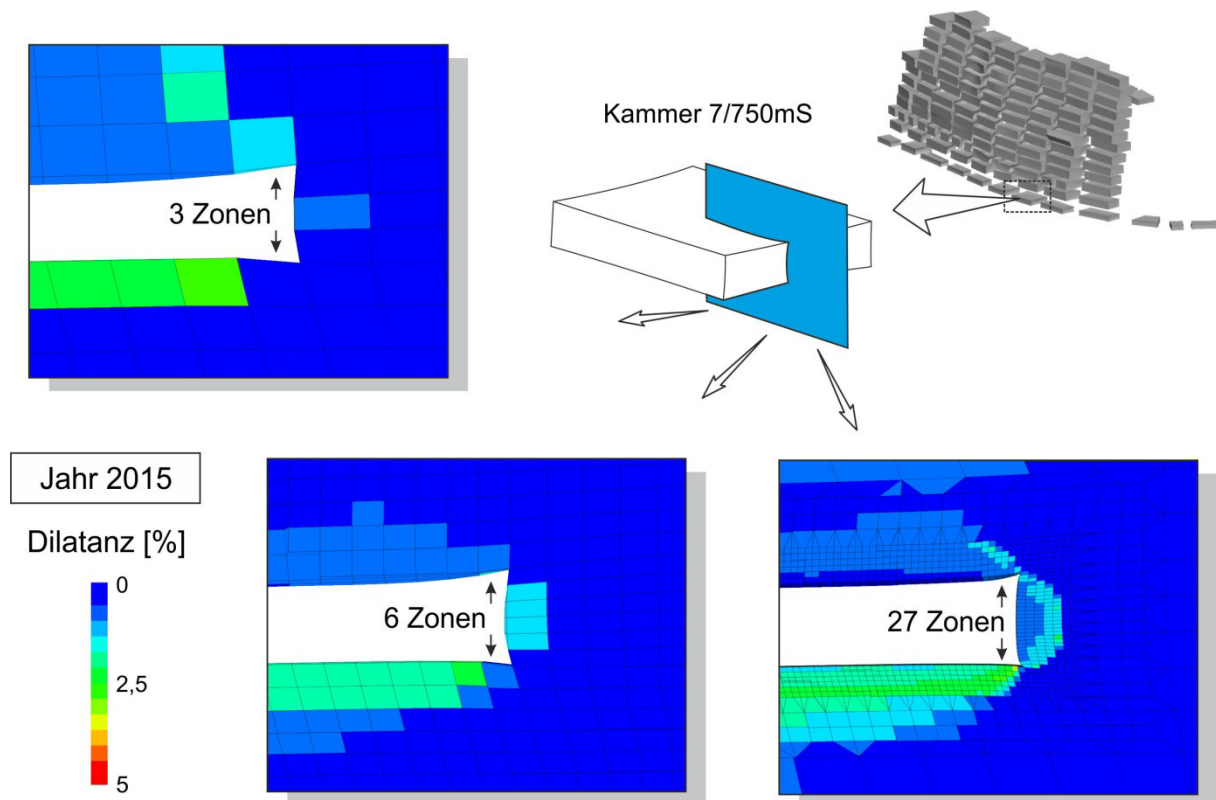


Bild 9.8: Exemplarischer Vergleich der numerischen Ergebnisse für die Dilatanz im Jahr 2015 in der Nähe der Kammer 7/750 für drei 3D-Berechnungsmodelle

Das „3 Zonen“-3D-Gesamtmodell mit einer sehr gut handhabbaren Größe hat die Durchführung zahlreicher numerischer Simulationen zur Validierung des Berechnungsmodells ermöglicht (s. Kapitel 7). Dieses 3D-Berechnungsmodell wird daher für die Bearbeitung globaler Fragestellungen als optimal ausgerichtet bewertet.

Das „6 Zonen“-3D-Gesamtmodell mit einer 8-fachen Vergrößerung der Zonenanzahl in TM-„Grubengebäude“ erhält durch die intensivierte Diskretisierung eine weniger handhabbare Größe und ist dann eher nur für stichpunktartige Untersuchungen anwendbar (keine umfangreichen Variationsanalysen).

Das „3 Zonen“-3D-Gesamtmodell mit dem integrierten „27 Zonen“-Lokalmodell mit einer ca. 700-fachen Vergrößerung der Zonenanzahl im Bereich des Lokalmodells besitzt eine immer noch gut handhabbare Größe. Somit hat dieses Modell in Bezug auf die Modellgröße noch ein Erweiterungspotential, das zum Beispiel in Form einer Vergrößerung des Bereiches des Lokalmodells oder auch in Form einer noch stärkeren Diskretisierungsverfeinerung im aktuell definierten Lokalmodellbereich realisiert werden kann.

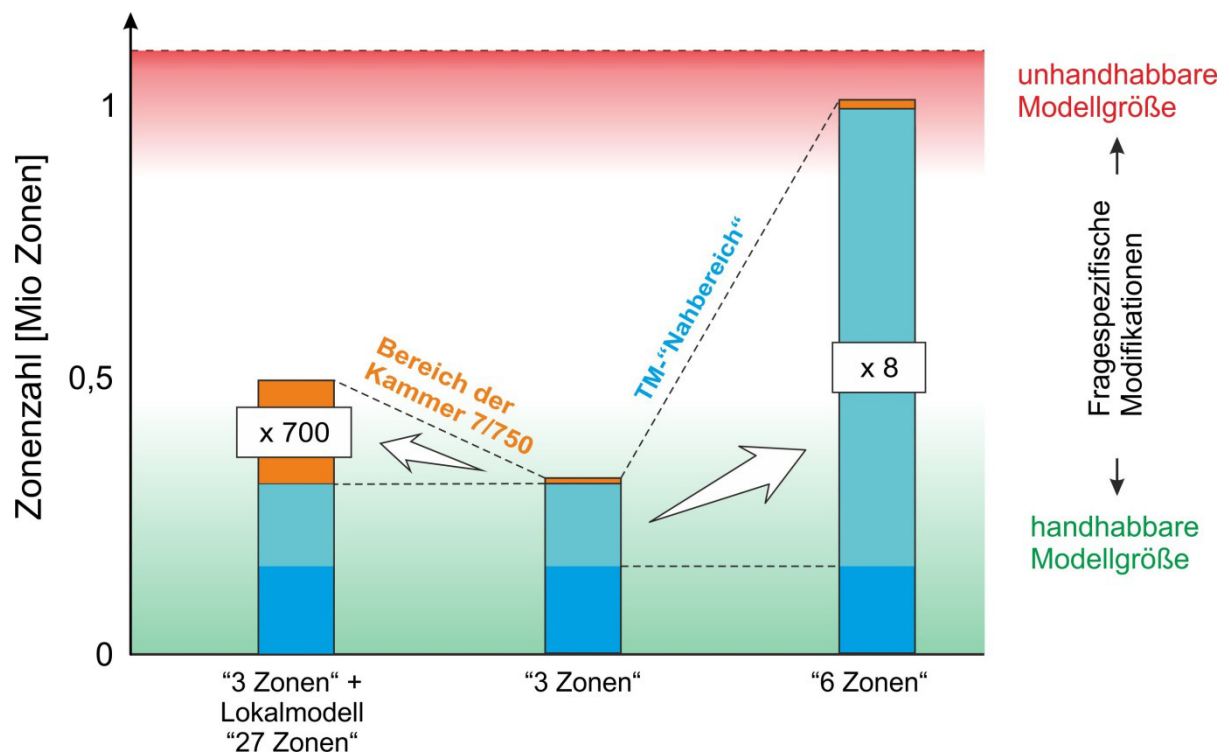


Bild 9.9: Schematische Gegenüberstellung der drei 3D-Gesamtmodelle in Bezug auf die Modellgröße/Zonenanzahl

10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Konzept entwickelt worden, das eine Systematisierung in der Vorgehensweise und eine Optimierung beim Aufbau eines Instrumentariums zur Durchführung von numerischen Untersuchungen für komplexe geomechanische Systeme mit Anwesenheit von Imponderabilien ermöglicht. Komplexe geomechanische Systeme sind dabei gekennzeichnet durch die Attribute Großräumigkeit, filigrane Teilstrukturen, nichtlineares Stoffmodell, Imponderabilien.

Dieses Konzept unterscheidet sich von den aus der Literatur bekannten Vorgehensweisen/Algorithmen durch eine praktische Orientierung, Spezifizierung auf die vorstehend genannten Untersuchungsobjekte und erhöhte Anforderungen an die Realitätsnähe und somit auf die Komplexität des aufzubauenden äquivalenten numerischen Systems.

Das Konzept ist wie eine systematische strukturierte schrittweise Vorgehensweise aufgebaut und besteht aus einigen aufeinanderfolgenden Bearbeitungsetappen:

- Voranalyse des realen Systems;
- Etappe I – Aufbau eines grundsätzlichen Verständnisses zum Systemverhalten;
- Etappe II – Aufbau und Validierung eines komplexen numerischen Instrumentariums für das Globalsystem;
- Etappe III – Anwendung des Globalmodells auf die vorgegebenen Fragestellungen;
- Etappe IV – Realisierung des eingebauten Modifikationspotentials.

Dieses in Kapitel 3 vorgestellte Konzept ist dann exemplarisch auf das komplexe geomechanische System der Schachtanlage Asse II/Südflanke angewendet worden. Zur Demonstration der Anwendung dieses System zur Untersuchung ausgewählt, das in Kapitel 4 näher beschrieben wird. Im Rahmen der in den Kapiteln 6-8 vorgestellten Realisierung des Konzeptes anhand des ausgewählten Beispiels wurde ein lateral erweitertes 3D-Gesamtmodell für das Grubengebäude Asse II/Südflanke (filigrane Struktur) und für die umgebenden geologischen Strukturen (großräumiger Bereiche) mit einer weitgehend realitätsnahen Abbildung der konfigurativen Elemente aufgebaut. Durch die in dem durch das Konzept gesteuerten Modell-Aufbauprozess optimierte Modellausgestaltung wurde eine akzeptable Rechenzeit erreicht, die eine umfangreiche Validierungsanalyse ermöglicht hat. Im Ergebnis dieser in Kapitel 7 beschriebenen Validierung wurde insgesamt eine plausible qualitative und eine teilweise auch quantitativ sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse der numerischen Simulationen mit dem gesamten Datenkollektiv der vorhandenen In-situ-Messwerte erreicht.

Das entwickelte numerische Instrumentarium kann somit vergleichsweise realitätsnah die geschichtliche Entwicklung des realen Systems abbilden und wird als eine geeignete Basis zur Erstellung von Prognosen zum zukünftigen Systemverhalten angesehen, sei es bei veränderten geogenen Einwirkungen, sei es infolge zusätzlicher technologischer Eingriffe.

Das 3D-Modell ist dabei so flexibel aufgebaut worden, dass für die Bearbeitung zusätzlicher zukünftiger Fragestellungen von diesem Modell ausgehend mit einem vergleichsweise geringen Zeitaufwand weitere spezialisierte Berechnungsmodelle aufgebaut werden können. Diese Möglichkeit ist in Kapitel 8 anhand von zwei Realisierungsbeispielen demonstriert worden. Zu diesem Zweck wurde in einem ersten Beispiel die Diskretisierung in einem schon existierenden Teilmodell modifiziert, während in einem zweiten Beispiel das numerische Modell für das großräumige untertägige System mit filigraner Struktur durch einen spezifischen lokalen Bereich mit einer extrem feinen Diskretisierung erweitert wurde. Ein komplex aufgebautes System soll dem Zweck dienen, die räumlich-zeitliche Wechselwirkung zwischen dem großräumigen System mit filigraner Struktur und einem zusätzlich integrierten lokalen System möglichst realitätsnah zeitabhängig zu erfassen.

Durch die in dieser Arbeit demonstrierte erfolgreiche Anwendung des vorgeschlagenen Konzeptes zur optimierten Durchführung numerischer Simulationen am Beispiel des geomechanischen Systems Asse II/Südflanke wird das Konzept als prinzipiell geeignet zur Realisierung von optimierten numerischen Analysen im Hinblick auf die Analyse des Tragverhaltens von komplexen großräumigen untertägigen Systemen mit integrierten filigranen Strukturen bei Anwesenheit auch von Imponderabilien angesehen.

Die im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung des entwickelten Konzeptes durchgeführten numerischen Simulationen haben gezeigt, dass die Realisierung zwar erfolgreich, jedoch vergleichsweise zeitaufwendig war. Zukünftig könnten zur Reduzierung des Zeitaufwandes bei der Modellerstellung im Rahmen des Konzeptes einige technische Realisierungsroutinen optimiert werden. Als ein weiterer wesentlicher Schritt zur Reduzierung des Zeitaufwandes bei der Modellerstellung im Rahmen des Konzeptes kann zukünftig die Integration/Miteinbeziehung von zunehmend Verbreitung findenden automatisierten Diskretisierungsalgorithmen anstelle der bisher verwendeten manuellen Modellraumaufteilung sein. Ein heutzutage schon realisierbares Potential in der Anwendung dieser automatisierten Diskretisierungsalgorithmen wird aber vorerst eher vor allem in der Diskretisierung von weniger bedeutenden Teilbereichen des Modells gesehen, die einen relativ geringen Anteil der Gesamtzonenzahl beinhalten. Somit wird zwar die Gesamtzonenzahl nur unwesentlich beeinflusst, der Zeitaufwand zur Erstellung dieser Modellbereiche könnte aber wesentlich reduziert werden.

Ausblickend kann zudem empfohlen werden, das Konzept auf weitere Beispiele anzuwenden, um Anwendungserfahrung zu sammeln und daraus folgend das vorgeschlagene Konzept in seiner aktuellen Form zu erweitern und zu optimieren. Dabei ist zu erwähnen, dass das Konzept auch für weniger komplexe Untersuchungsobjekte angewendet werden kann, wobei dann einzelne Etappen bzw. Bearbeitungsschritte an die Aufgabenstellung anzupassen sind und der Bearbeitungsaufwand dadurch insgesamt reduziert werden könnte.

11 Literaturverzeichnis

- ASME (2006)*: Guide for Verifikation and Validation in Computational Solid Mechanics, American Society of Mechanical Engineers, ASME Standard V&V 10-2006.
- Argüello, J. G., Rath, J. S. (2012)*: SIERPA mechanics for coupled multi-physics modeling of salt repositories, Mechanical Behavior of Salt VII – Berest, Ghoreychi, Hadj-Hassen & Tijani (eds) 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62122-9
- Adina R&D Inc. (2012)*: ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis), Report ARD 01-9, Watertown, MA, US
- ANSYS (2010)*: ANSYS User's Manual version 13.0, ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA
- Autodesk (2012)*: AutoCAD 2013. Command Reference Guide, Autodesk, Inc., 111 McInnis Parkway, San Rafael, CA 94903, USA
- Barbour S.L., Krahn J. (2004)*: Numerical Modeling –prediction or process? Geotechnical News, Dec. 2004, S. 44-52.
- Burland, J.B. (1987)*: Nash lecture: The teaching of soil mechanics – a personal view. Proceedings 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. III, Dublin 1987, E.T. Hanrahan, T.L.L. Orr, T.F. Widdis (Eds.), A.A Balkema, 1989, S. 1427-1447.
- Blanco Martín, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J.T., Wolters, R., Lux, K.-H. (2015)*: Coupled Modelling of the Thermal Simulation for Drift Emplacement underground test, Mechanical Behavior of Salt VIII – Roberts, Mellegard & Hansen (Eds) 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02840-1
- BGR (2015)*: Geomechanische Modellberechnungen zur Stabilität der Grubenbaue und Integrität der Salzbarriere im ERA Morsleben, Projektstand 2015, <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/Endlagerstandorte/laufend/Geomechanische-Modellberechnungen-Integrität-ERA-Morsleben.html>
- BfS (2015)*: Informationen homepage ASSE II, www.asse.bund.de, August 2015.
- Colenco (2005)*: Geowissenschaftlicher Langzeitprognose. Bericht 4927/01, Juni 2005

- DGGT (2014)*: Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik - EANG, Ernst & Sohn Verlag, ISBN: 978-3-433-03080-6
- Düsterloh, U. (2011)*: Geologische und geotechnische Barrieren. Sicherheitsnachweise und numerische Modellierung, TU-Clausthal, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, Vorlesungsskript 2011
- ENTRIA (2012)*: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen. Vorhabensbeschreibung zur Bildung einer Forschungsplattform, NTH 2012
- ERCOSPLAN (2004)*: Zusammenfassung der geologischen Grundlagen für die Langsicherheitsbewertung der Schachtanlage Asse II. GSF Bericht, Erfurt, 2004
- European Commission, COST C7 (2002)*: Guidelines for the use of advanced numerical analysis. Ed. David Potts et al., Thomas Telford, London, 2002
- Fahland, S., Heusermann, S., Schäfers, A. (2015)*: Geomechanical analysis and assessment of the integrity of the southern part in the Morsleben repository, Mechanical Behavior of Salt VIII – Roberts, Mellegard & Hansen (Eds) 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02840-1
- Faust, B., Krüger, R., Lucke, A., Tertel, S. (2011)*: JIFE – Java Application for Interactive Nonlinear Finite-Element Analysis in Multi-Physics. User's Manual, Berlin.
- GSF (2007)*: Dokumentation zur Verfüllung der Abbaue an der Südflanke der Schachtanlage Asse. Abschlussbericht. Ersteller: Tänzer, Revision 00 vom 26.07.2007
- Günther, R.-M., Kamlot, P., Weise, D., Gärtner, G. (2015)*: Untersuchungen lokaler gebirgsmechanischer Problemstellungen im Bergwerk Asse II unter Verwendung von 3D-Rechnmodellen, 44. Geomechanik Kolloquium, Leipzig, 13.11.2015
- Hohberg, J.-M. (2011)*: Anforderungen des Praktikers an die Aussagekraft numerische Modelle. SGBF-Herbsttagung „Geotechnische Parameter und Beiwerte“ (Lausanne 2009). Mitteilungen der Schweiz. Gesell. Für Boden- und Felsmechanik (neu Geotechnik Schweiz), H. 159, 2011, S. 31-40.
- Heusermann, S., Eickemeier, R., Fahland, S. (2015)*: Thermomechanical analysis of a fictive HLW repository in the Gorleben salt dome, Mechanical Behavior of Salt VIII – Roberts, Mellegard&Hansen (Eds) 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02840-1

- Heusermann, S., Lux, K.-H. & Rokahr, R. (1983):* Entwicklung mathematisch-mechanischer Modelle zur Beschreibung des Stoffverhaltens von Salzgestein. Schlussbericht zum Forschungsauftrag ET2011A der PLE Jülich, Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover.
- Heusermann, S., Vogel, P., Eickemeier, R., Nipp, H.-K. (2012):* Analysis of the integrity of the geological barrier in the Gorleben salt formation, Mechanical Behavior of Salt VII – Berest, Ghoreychi, Hadj-Hassen & Tijani (eds) 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62122-9
- Hou, Z. (2002):* Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung. Verheilung und hydromechanischer Kopplung, Habilitationsschrift, Heft Nr. 13, Schriftenreihe Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Institut für Aufbereitung und Deponietechnik, Technische Universität Clausthal, 2002.
- Itasca (2009):* Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Manual FLAC^{3D} 4.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, 2009
- IfG Leipzig (2006a):* Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase, Bericht im Rahmen der LVB II des Rahmenvertrages „Gebirgsmechanische Modellierung“, Ersteller: IfG Leipzig, Revision 02 vom 06.10.2006
- IfG Leipzig (2006b):* Dreidimensionale gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Standsicherheitsanalyse des Bergwerkes Asse, Bericht im Rahmen der LVB VIII des Rahmenvertrages „Gebirgsmechanische Modellierung“. Ersteller: IfG Leipzig, Stand 03.11.2006
- IfG Leipzig (2007):* Gebirgsmechanische Zustandsanalyse des Tragsystems der Schachanlage Asse II, Kurzbericht zum Rahmenvertrag „Gebirgsmechanische Modellierung“. Ersteller: IfG Leipzig, Stand 09.11.2007
- IfG Leipzig (2009):* Gebirgsmechanische Zustandsanalyse und Prognose auf der Basis von Standortdaten sowie 3D-Modellrechnungen, Bericht zum Rahmenvertrag „Gebirgsmechanische Modellierung“. Ersteller: IfG Leipzig, Stand 11.03.2009
- IfG Leipzig (2012):* Gebirgsmechanische Gefährdungsanalyse der Abbaue 3 und 4 auf der 490-m-Sohle und Abbau 2 auf der 511-m-Sohle. Ersteller: IfG Leipzig, Stand 13.06.2012
- Kamlot, P., Günther, R.-M., Gärtner, G., Teichmann, L. (2015):* Geomechanical assessment of the Asse II operation phase until radioactive waste retrieval using large 3D-models,

- Mechanical Behavior of Salt VIII – Roberts, Mellegard & Hansen (Eds) 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02840-1
- Kachanov, L.M. (1986):* Introduction of Continuum-Damage-Mechanics. Martinus Nijhoff Publishers.
- Kato Tosio (1966):* Perturbation Theory for linear operators, Springer Science+Business, New York 1966, ISBN 978-3-662-12680-6
- Landau, L.D., Lifschitz, E.M., Ziesche, P. (2012):* Lehrbuch der theoretischen Physik III. Quantenmechanik (Landau, L.D./E.M. Lifschitz: Lehrbuch der Theoretischen Physik), von Paul Ziesche (Herausgeber), Lew D. Landau (Autor), Eewgeni M. Lifschitz (Autor), Gebundene Ausgabe – Dezember 2012, ISBN: 978-3055000676.
- Lerche, S. (2012):* Kriech- und Schädigungsprozesse im Salinargebirge bei mono- und multizyklischer Belastung. Dissertation an der TU Clausthal, 2012.
- Lux, K.-H.; Rutenberg, M.; Seeska, R.; Feierabend, J.; Düsterloh, U. (2015):* Kopplung der Softwarecodes FLAC^{3D} und TOUGH2 in Verbindung mit In-situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02E11041, Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H. (1984):* Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrung im Salzkavernenbau, Ein Beitrag zur Entwicklung von Prognosemodellen für den Hohlraumbau im duktilen Salzgebirge. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Lux, K.-H., Roussev, P., Dyogtyev, O., Wolters, R. (2011):* Risikobetrachtung für eine längerfristige Offenhaltung der Asse. Teil Gebirgsmechanische Untersuchungen. Erste gebirgsmechanische Impressionen zum längerfristigen Tragverhalten. Abschlussbericht / Teil 1.
- Lux, K.-H., Lerche, S., Dyogtyev, O., Wolters, R. (2012):* Risikobetrachtung für eine längerfristige Offenhaltung der Asse. Teil Gebirgsmechanische Untersuchungen. Reduzierung von identifizierten Defiziten für die Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit. Abschlussbericht / Teil 2.
- Lux, K.-H., Düsterloh, U., Lerche, S., Dyogtyev, O., Pan, T. (2015):* Risikobetrachtung für eine längerfristige Offenhaltung der Asse. Teil Gebirgsmechanische Untersuchungen. Erweiterte gebirgsmechanische Untersuchungen zum längerfristigen Tragverhalten der Schachtanlage Asse II im Hinblick auf die Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit. Abschlussbericht / Teil 3.

NiT (2005): Handbuch ELBA+. Pressbaum: NiT Technisches Büro GmbH, 24. Mai 2005

Öko(2016): Projektgruppe Asse: Beratungsleistungen für BMUB bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Schachanlage Asse II. Abschlussbericht über die Arbeiten der Projektgruppe im Zeitraum Februar 2013 bis Januar 2016, Vorhaben UM13A03505, Berichtersteller: S. Alt, Öko-Institut e.V, Darmstadt 15.04.2016

Rautman, C. (2014): Cut-away 3-D model of the Bayou Choctaw salt dome, La., 2014, http://rautman.swcp.com/2014/04/bc_saltdome/

SANDIA(2006): Three Dimensional Simulation for Bayou Choctaw Strategic Petroleum Reserve (SPR), SANDIA REPORT (SAND2006-7589), Byoung-Yoon Park, Brian L. Ehgartner, Moo Y. Lee, (December 2006)

Schilling, M.A. (2000): Toward a General Modular Systems Theory and Its Application to Interfirm Product Modularity. In: The Academy of Management Review. Band 25, Nr. 2, 2000, S. 312–334, doi:10.5465/AMR.2000.3312918

Sobolik, S.R., Lord, A.S. (2015): Operation, maintenance, and monitoring of large-diameter caverns in oil storage facilities in domal salt, Mechanical Behavior of Salt VIII – Roberts, Mellegard&Hansen (Eds) 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02840-1

*Park, B.Y., Ehgartner, B.L. (2012):*Expantion analyses of strategic petroleum reserve in Bayou Choctaw, Mechanical Behavior of Salt VII – Berest, Ghoreychi, Hadj-Hassen & Tijani (eds) 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62122-9

Wolters, R. (2014): Thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Analysen zum Tragverhalten von Kavernen im Salinargebirge vor dem Hintergrund der Energieträgerspeicherung und der Abfallentsorgung. Dissertation an der TU Clausthal, 2014.

Wittke, W. (1984): Felsmechanik – Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springerverlag, ISBN 3-540-13016-0.

Wolters, R., Herchen, K., Düsterloh, U. & Lux, K.-H. (2010): BMBF-Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz, Abschlussbericht Teilprojekt 5 - Stoffmodell Hou/Lux, BMBF-FKZ 02C1617. Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.

Wallmüller (2012): Serie von Längs- und Querschnitten durch den Asse-Höhenzug/Geologische Sohlenrisse im Gebiet der Schachtanlage Asse II. Ersteller: Wallmüller, Stand 2012

Zhang, C.-L. (2000): Kataster der gesteinsmechanischen Daten und Parameter für den Standort Asse, Band 1 und 2. GSF-Forschungsbergwerk Asse, Teilbereich Standortüberwachung. April 2000.

Zhang, C.-L. (2000): Kataster der gesteinsmechanischen Daten und Parameter für den Standort Asse, Band 1 und 2. GSF-Forschungsbergwerk Asse, Teilbereich Standortüberwachung. April 2000.

Unterlagen zu In-situ-Messwerten

- ASSE-GmbH (2011b)*: Tagesnivellement - Begleitbericht zum Senkungsnivellement 2010.
Ersteller: ASSE-GmbH, Stand 19.01.2011
- ASSE-GmbH (2014a)*: 140. Zwischenbericht Extensometermessungen. Ersteller: ASSE-GmbH/LÖFFLER, Stand 21.02.2014
- ASSE-GmbH (2014b)*: Inklinometermessungen 2013 – 17. Bericht. Ersteller: ASSE-GmbH/LÖFFLER, Stand 20.05.2014
- ASSE-GmbH (2011a)*: Fortschreibung der Darstellung und Bewertung der gebirgsmechanischen Situation im Bereich der Südflanke der Schachanlage Asse II auf der Grundlage gebirgsmechanischer In-situ-Messungen. Ersteller: ASSE-GmbH, Stand 15.01.2011
- ASSE-GmbH (2006)*: Darstellung und Bewertung des Spannungs- und Verformungszustandes im Tragsystem der Südflanke der Schachanlage Asse nach Abschluss der Versatzmaßnahme auf der Grundlage gebirgsmechanischer In-situ-Messungen. Ersteller: Dr. Stockmann, Stand 11/2006
- BfS (2008a)*: Ergebnisse der Spannungsmessungen in Tragelementen des Grubengebäudes der Schachanlage Asse (Arbeitsbericht des Teilbereiches Standortüberwachung Nr. 01/08).
Ersteller: Dr. Gärtner/TB Standortüberwachung, Stand 18.01.2008
- BfS (2008b)*: Versatzdruckmessungen im Steinsalzbaufeld an der Asse-Südflanke. Sachstandbericht (Arbeitsbericht des Teilbereiches Standortüberwachung Nr. 02/08).
Ersteller: Dr. Gärtner/TB Standortüberwachung, Stand 22.01.2008
- Colenco (2006)*: Deckgebirgsmodellierung Phase IV Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Standortes Asse, Colenco Bericht 3331/71 (September 2006)
- Colenco (2006)*: Hydrogeologische Modellvorstellungen, Colenco Bericht 4956/07, Rev. 3, (November 2006)

Persönliche Daten:

Name: Oleksandr Dyogtyev
Geburtsdatum: 26. August 1979
Geburtsort: Charkow, Ukraine
Eltern: Dyogtyev Oleksandr und Dyogtyeva Olga, geb. Koreneva
Familienstand: ledig

Ausbildung:

1986 – 1990: Grundschule Nr.88, Kharkov
1990 – 1996: Allgemeine Hochschulreife, Abitur, Schule Nr.88, Kharkov
1996 – 2002: Studium an der Kharkover Technischen Universität (KhPI), Kharkov,
Studienabschluss: BC, MC Diplom-Ingenieur Forscher
2002 – 2005: Promotionsstudium an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am
Institut für Prozess- und Werkstoffmodellierung bei Prof. Dr.-Ing. habil.
H. Altenbach
2006 – 2007: freier Doktorand mit Aufenthalt in Kharkov, Ukraine

Berufstätigkeit:

2008 – 2009: Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Hannover
am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen bei Prof. Dr.-
Ing. B. Denkena
Seit 04. 2010: Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Clausthal
am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik bei Univ. Prof. Dr.-
Ing. habil. K.-H. Lux

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik

Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
Technische Universität Clausthal

- Heft 1 P.C.W. Stephan: Entwicklung und Erprobung eines Modellprüfstandes zur Lösung dreidimensionaler gebirgsmechanischer Aufgaben im Steinkohlenbergbau
- Heft 2 G. Hensel: Planung, Durchführung und Analyse markscheiderischer Messungen zur Erfassung von Gebirgsbewegungen in dem Versuchsbergwerk Asse
- Heft 3 T. Schmidt: Zur Optimierung des Gasspeicherbetriebes mit unterirdischen Kavernen im Salz unter besonderer Berücksichtigung gebirgsmechanischer und thermomechanischer Aspekte
- Heft 4 U. Düsterloh: Gebirgsmechanische Untersuchungen zum Nachweis der geotechnischen Sicherheit von Deponiekavernen. Diss. TU Clausthal 1993
- Heft 5 S. Xiao: Gebirgsmechanische Untersuchungen zu Bruchmechanismen und zur Gebirgsdruckverteilung an Abbaurändern im Steinkohlengebirge. Diss. TU Clausthal 1993
- Heft 6 Nutzung bergbaulicher Hohlräume als Speicher und Deponien sowie Verwertung von Reststoffen/Abfällen im Bergbau unter besonderer Berücksichtigung gebirgsmechanischer Aspekte. Vorträge anlässlich des Kolloquiums am 26. und 27. Oktober 1995
- Heft 7 T. Schröpfer: Numerische Analyse zum Tragverhalten von Gesteinsstrecken mit Spritzbeton-Ausbau im Ruhrkarbon. Diss. TU Clausthal 1995
- Heft 8 J. Yin: Untersuchungen zum zeitabhängigen Tragverhalten von tiefliegenden Hohlräumen im Feld mit Spritzbetonausbau. Diss. TU Clausthal 1996
- Heft 9 Z. Hou: Untersuchungen zum Nachweis der Standsicherheit für Untertagedeponien im Salzgebirge. Diss. TU Clausthal 1997
- Heft 10 J. Hesser: Zum Einfluß unterschiedlicher Spritzbetonqualitäten auf das Tragverhalten tiefliegender Gesteinsstrecken. Laborative Untersuchungen und numerische Analysen. Diss. TU Clausthal 2000
- Heft 11 J. Bertram: Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Auslegungskriterien für Kavernen im Salinargebirge. Diss. TU Clausthal 2000
- Heft 12 Z. Xie: Rechnerische Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Abdichtungsbauwerken in Untertagedeponien im Fall eines Lösungszutritts. Diss. TU Clausthal 2002
- Heft 13 Z. Hou: Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigungen, Verheilung und hydromechanischer Kopplung. Habil. Schrift TU Clausthal 2002
- Heft 14 Clausthaler Kolloquium zur Endlagerung 2003 und Ehrenkolloquium zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Klaus Kühn
- Heft 15 S. Eberth: Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge. Diss. TU Clausthal 2008

- Heft 16 U. Düsterloh: Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlraumbauten im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen. Habil. Schrift TU Clausthal 2009
- Heft 17 O. Czaikowski: Laborative und rechnerische Untersuchungen zu geomechanisch-geohydraulischen Wechselwirkungen im Tongestein im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Diss. TU Clausthal 2011
- Heft 18 S. Lerche: Kriech- und Schädigungsprozesse im Salinargebirge bei mono- und multizyklischer Belastung. Diss. TU Clausthal 2012
- Heft 19 R. Dresen: Thermische Effekte und ihre Berücksichtigung bei Auslegung und Betrieb von Gasspeicherkavernen sowie Aspekte des Kavernenmonitorings. TU Clausthal 2013
- Heft 20 R. Wolters: Thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Analysen zum Tragverhalten von Kavernen im Salinargebirge vor dem Hintergrund der Energieträgerspeicherung und der Abfallentsorgung. Diss. TU Clausthal 2014
- Heft 21 O. Dyogtyev: Numerische Analyse des Tragverhaltens komplexer gebirgsmechanischer untertägiger Systeme mit filigranen Strukturen bei Anwesenheit von Imponderabilien. Diss. TU Clausthal 2017